

STEVEN WEINBERG s-a născut la New York în 1933. Înclinația sa timpurie pentru știință a fost încurajată de familie, iar de la 15–16 ani preocupările sale s-au concentrat asupra fizicii teoretice. A studiat la Universitatea Cornell, apoi la Institutul de Fizică Teoretică din Copenhaga (care poartă acum numele lui Niels Bohr) și a obținut doctoratul la Universitatea Princeton. În îndelungata sa carieră didactică, a predat între altele la universitățile Columbia, Berkeley, Harvard și Texas. Cercetările sale s-au concentrat de la început cu precădere asupra teoriilor de câmp, domeniul „fierbinte“ al fizicii de la jumătatea secolului, iar spre sfârșitul anilor '60 și începutul anilor '70 a contribuit decisiv la elaborarea teoriei câmpului electroslab, teorie ce unifică interacția electromagnetică cu cea nucleară slabă. Acest pas imens în direcția unificării tuturor interacțiilor din natură, visul de aur al fizicienilor, i-a adus în 1979 Premiul Nobel (primit în același an și de Sheldon Glashow și Abdus Salam pentru contribuții la aceeași teorie a câmpului electroslab). Din anii '60, cercetările lui Steven Weinberg încep să se orienteze și spre astrofizică, iar în 1972 publică *Gravitation and Cosmology*, care devine un tratat de referință în domeniu. Este de asemenea autorul unor cărți care se adresează publicului larg: *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (1977, tradusă și în limba română de Gheorghe Stratan), *The Discovery of Subatomic Particles* (1983, apărută într-o ediție revăzută în 2003 și tradusă în limba română de Irinel Caprini), *Elementary Particles and the Laws of Physics* (1987, împreună cu Richard Feynman), *Dreams of a Final Theory* (1993), *Facing Up: Science and its Cultural Adversaries* (2001), *Glory and Terror: The Coming Nuclear Danger* (2004).

STEVEN WEINBERG

VISUL UNEI TEORII FINALE

În căutarea legilor
ultime ale naturii

Traducere din engleză de
BOGDAN AMUZESCU



HUMANITAS

BUCUREȘTI

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

WEINBERG, STEVEN

Visul unei teorii finale: în căutarea legilor ultime ale naturii / Steven Weinberg;

trad.: Bogdan Amuzescu. – București: Humanitas, 2008

ISBN 978-973-50-2248-8

I. Amuzescu, Bogdan (trad.)

539

STEVEN WEINBERG

DREAMS OF A FINAL THEORY

© 1992 by Steven Weinberg

All rights reserved

© HUMANITAS, 2008, pentru prezenta versiune românească

EDITURA HUMANITAS

Piața Presei Libere 1, 013701 București, România

tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51

www.humanitas.ro

Comenzi CARTE PRIN POȘTĂ: tel./fax 021/311 23 30

C.P.C.E. – CP 14, București

e-mail: cpp@humanitas.ro

www.librariilehumanitas.ro

www.libhumanitas.ro

Prefață

Această carte prezintă o mare aventură intelectuală – căutarea legilor ultime ale naturii. Visul unei teorii finale însuflețește o mare parte din cercetările actuale în fizica energiilor înalte și, chiar dacă nu știm cum ar putea arăta legile finale sau câți ani vor trece până la descoperirea lor, credem că teoriile din prezent ne permit deja să întrezărim unele trăsături ale teoriei finale.

Însăși ideea de teorie finală e controversată și face obiectul unei intense dezbateri la ora actuală. Această dispută a ajuns chiar și în Congresul american; fizica energiilor înalte a devenit tot mai scumpă și necesită finanțare publică, în parte tocmai datorită misiunii ei istorice de a dezvălui legile ultime.

De la bun început, intenția mea a fost să prezint problemele legate de ideea unei teorii finale ca parte a istoriei intelectuale a zilelor noastre, adresându-mă cititorilor fără cunoștințe prealabile de fizică sau matematică superioară. Cartea aduce în discuție ideile esențiale ce stau la baza cercetărilor actuale de la frontierele fizicii. Ea nu e însă un manual de fizică, iar cititorul nu va găsi capitole separate despre particule, forțe, simetrii și corzi. Am introdus în schimb ideile fizicii moderne când am arătat ce înțelegem prin teorie finală și cum vom putea ajunge la ea. În această privință m-am lăsat călăuzit de propria-mi experiență de cititor în domenii precum istoria, în care sunt doar un amator. Istoricii cedează deseori ispitei de a oferi întâi o istorie narativă, urmată de capitole separate despre populație, economie, tehnologie etc. Pe de altă parte, istoricii pe care îi citim cu plăcere, de la Tacit și Gibbon la J.H. Elliott și S.E. Morison, contopesc narațiunea cu aspectele care țin de fundal, pledând în același timp în favoarea concluziilor pe care vor să le prezinte cititorului. Scriind această carte, am încercat să folosesc aceeași strategie și să rezist ispitelor ordinii. De asemenea, nu am

ezitat să introduc un material istoric sau științific cunoscut poate cititorilor care sunt istorici sau oameni de știință, ba chiar să mă repet acolo unde am crezut că e necesar. După cum spunea Enrico Fermi, nu trebuie să subestimăm niciodată plăcerea pe care o simțim atunci când auzim un lucru deja cunoscut.

În linii mari, *Visul unei teorii finale* e alcătuit din trei părți și o încheiere. Prima parte, capitolele 1–3, prezintă ideea de teorie finală; capitolele 4–8 explică felul în care am reușit să avansăm către o teorie finală; iar în capitolele 9–11 fac speculații asupra formei teoriei finale și asupra modului în care descoperirea ei va influența omenirea. În fine, în capitolul 12 prezint argumentele pro și contra Superacceleratorului Supraconductor, un instrument nou și costisitor, absolut indispensabil fizicienilor din domeniul energiilor înalte, dar a cărui finanțare în viitor rămâne problematică.

Cititorii vor găsi o prezentare mai amănunțită a unor idei din textul principal într-o serie de note de la sfârșitul lucrării. Unele concepte mult simplificate în textul principal sunt precizate în notele din final. Aceste note includ și referințe bibliografice pentru o parte din materialul citat în text.

Îi sunt profund recunoscător Louisei Weinberg pentru că m-a îndemnat să rescriu o versiune mai veche a acestei cărți și pentru că a înțeles cum anume trebuia făcut acest lucru.

Le mulțumesc călduros lui Dan Frank de la Pantheon Books pentru încurajările sale, pentru îndrumarea și redactarea atentă, lui Neil Belton de la Hutchinson Radius și agentului meu Morton Janklow pentru sugestiile lor importante.

Le sunt de asemenea îndatorat pentru comentarii și sfaturi privind diferite aspecte filozofilor Paul Feyerabend, George Gale, Sandra Harding, Myles Jackson, Robert Nozick, Hilary Putnam și Michael Redhead; istoricilor Stephen Brush, Peter Green și Robert Hankinson; juriștilor Philip Bobbitt, Louise Weinberg și Mark Yudof; specialiștilor în istoria fizicii Gerald Holton, Abraham Pais și S. Samuel Schweber; fizicianului-teolog John Polkinghorne; psihiatrilor Leon Eisenberg și Elizabeth Weinberg; biologilor Sydney Brenner, Francis Crick, Lawrence Gilbert, Stephen J. Gould și Ernst Mayr; fizicienilor Yakir Aharonov,

Sidney Coleman, Bryce De Witt, Manfred Fink, Michael Fisher, David Gross, Bengt Nagel, Stephen Orzsag, Brian Pippard, Joseph Polchinski, Roy Schwitters și Leonard Susskind; chimistului Roald Hoffmann; astrofizicienilor William Press, Paul Shapiro și Ethan Vishniac; scriitorilor James Gleick și Lars Gustafsson. Ei m-au ajutat să evit multe erori grave.

STEVEN WEINBERG

Austin, Texas

August 1992

CAPITOLUL I

Prolog

*Dacă vreodată o frumusețe am văzut,
Și am dorit, și am avut,
A fost doar visul tău.*

JOHN DONNE, *Bunul mâine*

Secolul pe cale să se încheie a dus, în fizică, la o nebanuită lărgire a frontierelor cunoașterii științifice. Teoria relativității speciale și generale a lui Einstein ne-a schimbat pentru totdeauna perspectiva asupra spațiului, timpului și gravitației. Într-o și mai radicală ruptură cu trecutul, mecanica cuantică a transformat însuși limbajul pe care îl folosim pentru a descrie natura: în loc de particule cu poziții și viteze bine definite, am început să vorbim despre funcții de undă și probabilități. Din fuziunea relativității cu mecanica cuantică s-a dezvoltat o nouă perspectivă asupra lumii, în care materia și-a pierdut rolul central. Acest rol a fost preluat de principiile de simetrie, unele dintre ele fiind ascunse vederii noastre în stadiul actual al universului. Pe aceste baze am construit cu succes teoria electromagnetismului și a interacțiunilor nucleare slabe și tari dintre particulele elementare. Am simțit deseori ce a simțit Siegfried, după ce a băut din sângele balaurului, când a descoperit cu uimire că înțelege graiul păsărilor.

Acum însă ne-am împotmolit. De pe la mijlocul anilor '70 trăim cea mai frustrantă perioadă din istoria fizicii particulelor elementare. Plătim prețul propriului nostru succes: teoria a avansat atât de mult încât pentru a progresa în continuare trebuie să studiem procese la energii care depășesc posibilitățile dispozitivelor experimentale din prezent.

Pentru a ieși din acest impas, fizicienii au început în 1982 să conceapă un proiect științific fără precedent ca anvergură și costuri:

Superacceleratorul Supraconductor, pe scurt SSC (Superconducting Super Collider). În forma sa finală, planul prevede săparea unui tunel circular lung de 53 de mile, undeva la sud de Dallas. În acest tunel subteran mii de magneți supraconductori vor dirija două fascicule de particule încărcate electric, cunoscute sub numele de protoni, în sensuri opuse, de milioane de ori de-a lungul inelului. Protonii vor fi accelerați până la o energie de 20 de ori mai mare decât cea mai înaltă energie obținută în acceleratoarele de particule existente. În câteva puncte de-a lungul inelului, protonii celor două fascicule vor fi puși să se ciocnească de sute de milioane de ori pe secundă, iar detectoare enorme, unele cântărind zeci de mii de tone, vor înregistra ce se întâmplă în timpul acestor ciocniri. Costul proiectului a fost estimat la peste 8 miliarde de dolari.

Proiectul superacceleratorului a întâmpinat o puternică opoziție nu numai din partea unor senatori mai rezervați, dar și din partea unor oameni de știință care preferau ca banii să fie investiți în domeniile lor de activitate. Așa-numita „știință mare“ e deseori criticată, iar superacceleratorul nu a întârziat să devină ținta acestor atacuri. Între timp, consorțiul european CERN (Centrul European pentru Cercetări Nucleare) intenționează să construiască o instalație similară, Marele Accelerator de Hadroni – LHC (Large Hadron Collider)*. LHC va costa mai puțin decât SSC, fiindcă va fi folosit un tunel existent în munții Jura, lângă Geneva, dar din această cauză energia lui se va limita la mai puțin de jumătate din cea a SSC. În multe privințe, disputa americană privind SSC seamănă cu cea din Europa privind rostul construirii LHC.

În 1992, când această carte era trimisă la tipar, fondurile pentru SSC care fuseseră anulate printr-un vot din iunie al Camerei Reprezentanților au fost realocate în august printr-un vot al Senatului. Viitorul superacceleratorului ar fi asigurat în cazul unei finanțări externe consistente, dar deocamdată această posibilitate nu se întrevide. După cum stau lucrurile, chiar dacă finanțarea a fost aprobată anul acesta, există posibilitatea sistării ei în anul următor, și așa mai departe în continuare, până la încheierea proiectului. S-ar putea

* Primele teste la LHC au avut loc în septembrie 2008. (N. red.)

ca în anii următori cercetarea fundamentelor fizicii să ajungă în impas, pentru a fi reluată abia după mulți ani.*

Aceasta nu e o carte despre superaccelerator, dar disputele legate de acest proiect m-au obligat să vorbesc în public și să depun mărturie în fața Congresului pentru a explica ce urmărim să obținem în studiile noastre asupra particulelor elementare. V-ați putea închipui că, după treizeci de ani de muncă în fizică, ar trebui să nu întâmpin nici o dificultate, dar se dovedește că nu e atât de ușor.

În ce mă privește, bucuria muncii în sine a constituit întotdeauna o motivație suficientă. Stând la biroul meu sau la o masă într-o cafenea, operez cu expresii matematice și mă simt precum Faust jucându-se cu pentagramele sale înainte de sosirea lui Mefisto. Rareori abstracțiunile matematice, datele experimentale și intuiția fizică se contopesc într-o teorie clară despre particule, forțe și simetrii. Încă și mai rar teoria se dovedește a fi corectă; câteodată experimentele arată că natura se comportă într-adevăr așa cum afirmă teoria.

Dar lucrurile nu se opresc aici. Pentru fizicienii care studiază particulele elementare mai există o motivație, greu de explicat chiar și pentru ei înșiși.

Teoriile actuale au doar o valabilitate limitată, sunt provizorii și incomplete. Din când în când însă, zărim în spatele lor o teorie finală, a cărei valabilitate e nelimitată, o teorie pe deplin completă și coerentă. Căutăm adevărurile universale ale naturii, iar odată descoperite, încercăm să le explicăm arătând cum pot fi deduse din adevăruri și mai profunde. Să ne închipuim că spațiul principiilor științifice e plin cu săgeți îndreptate de la un principiu la cele care îl explică. Aceste săgeți nu rătăcesc la întâmplare. Dimpotrivă, sunt toate legate și, dacă le parcurgem în sens invers, par să aibă toate un punct de pornire comun. Acest punct de pornire, sursa tuturor explicațiilor, este ceea ce înțeleg eu prin teorie finală.

Evident, nu dispunem încă de o teorie finală și nu e probabil să o descoperim prea curând. Dar din când în când descoperim

* Într-adevăr, proiectul a fost anulat de Congresul american în 1993. Costul lui depășea 12 miliarde de dolari, iar decizia a fost impusă de recesiunea economică prin care treceau Statele Unite. Steven Weinberg a fost unul dintre cei mai fervenți susținători ai acestui proiect. (N. red.)

indicii că nu e foarte departe. Uneori, în discuțiile dintre fizicieni, când se dovedește că idei frumoase din punct de vedere matematic sunt într-adevăr relevante pentru lumea reală, avem sentimentul că există ceva în spatele tablei, un adevăr mai profund ce prefigurează o teorie finală și dă eleganță ideilor noastre.

Vorbind despre o teorie finală, o mulțime de întrebări și de definiții ne vin în minte. Ce înțelegem când spunem că un principiu științific îl „explică” pe altul? De unde știm că există un punct de pornire comun pentru toate aceste explicații? Îl vom descoperi oare vreodată? Cât de aproape suntem? Cum va arăta teoria finală? Ce părți din fizica actuală vor supraviețui în teoria finală? Ce va avea ea de spus despre viață și conștiință? Și, când vom avea o asemenea teorie, ce se va întâmpla cu știința și spiritul uman? Aceste întrebări sunt tratate succint în primul capitol, dar vor primi un răspuns mai amplu în restul cărții.

Visul unei teorii finale nu a apărut în secolul XX. În Occident, îi putem găsi sursele într-o școală care a înflorit cu un secol înainte de nașterea lui Socrate, în orașul grecesc Milet, situat la vărsarea râului Meandru în Marea Egee. Nu știm prea multe despre învățăturile presocraticilor, dar din relatări ulterioare și din cele câteva fragmente originale care s-au păstrat rezultă că milesienii căutau deja să explice toate fenomenele naturale prin intermediul unui constituent fundamental al materiei. Pentru Tales, primul dintre filozofii milesieni, substanța fundamentală era apa; pentru Anaximene, ultimul reprezentant al acestei școlii, era aerul.

Astăzi, ideile lui Tales și Anaximene ne fac să zâmbim. Prețuim mai mult o școală apărută cu un secol mai târziu la Abdera, pe țărmurile Traciei. Aici, Democrit și Leucip susțineau că întreaga materie e compusă din infime particule veșnice, numite atomi. (Atomismul își are rădăcinile în metafizica indiană, încă înainte de Democrit și Leucip.) Acești primi atomiști au dovedit o precocitate uimitoare, dar nu mi se pare foarte important faptul că milesienii „s-au înșelat” și că, într-un anume sens, teoria atomică a lui Democrit și Leucip „era corectă”. Nici unul dintre presocratici, din Milet sau din Abdera, n-a ajuns să formuleze condiția care, din perspectivă modernă, trebuie să fie îndeplinită de o bună explicație științifică: înțelegerea *cantitativă* a fenomenelor. Cât de

mult avansăm pe calea înțelegerii naturii dacă Tales sau Democrit ne spun că o piatră e alcătuită din apă ori din atomi, dar tot nu știm cum să-i calculăm densitatea, duritatea sau conductibilitatea electrică? Și, bineînțeles, fără capacitatea de a face predicții cantitative nu putem spune dacă Tales sau Democrit au dreptate.

Când am predat fizică studenților umaniști de la universitățile din Texas și Harvard am simțit că principala mea sarcină (și fără îndoială cea mai dificilă) era să-i fac să simtă puterea pe care ți-o dă capacitatea de a calcula în detaliu ce se întâmplă cu diferite sisteme fizice în diferite condiții. I-am învățat să calculeze devierea unei raze catodice sau căderea unei picături de ulei nu pentru că ar fi acel gen de lucruri pe care toată lumea are nevoie să le calculeze, ci fiindcă în felul acesta puteau simți ei înșiși ce înseamnă cu adevărat principiile fizicii. Cunoașterea principiilor care determină aceste mișcări și altele asemenea este esența fizicii și reprezintă o prețioasă componentă a civilizației noastre.

Din această perspectivă, „fizica“ lui Aristotel nu era cu nimic mai bună decât precedentele speculații mai puțin sofisticate ale lui Tales și Democrit. În cărțile sale *Fizica* și *Despre cer*, Aristotel consideră că mișcarea unui proiectil e în parte naturală și în parte nenaturală; mișcarea sa naturală, la fel ca în cazul tuturor corpurilor grele, e orientată în jos, către centrul lucrurilor, iar mișcarea sa nenaturală se datorează aerului, a cărui deplasare e generată de ceea ce a pus în mișcare proiectilul. Dar cât de repede se deplasează proiectilul pe traiectoria sa și cât departe ajunge până să atingă solul? Aristotel nu spune că aceste calcule sau măsurători sunt prea greu de efectuat sau că nu se cunosc încă destule lucruri despre legile mișcării pentru a da o descriere detaliată a mișcării proiectilului. Aristotel nu dă nici un răspuns, corect sau fals, fiindcă asemenea întrebări i se par pur și simplu lipsite de sens.

Dar de ce are rost să ne punem asemenea întrebări? Cititorului, la fel ca lui Aristotel, s-ar putea să nu-i pese prea mult cât de repede cade proiectilul – nici mie nu-mi prea pasă. Important e că acum noi cunoaștem *principiile* – legile newtoniene ale mișcării și gravitației și ecuațiile aerodinamicii – care determină cu precizie poziția proiectilului în fiecare moment al zborului. Nu spun aici că putem calcula exact mișcarea proiectilului. Curgerea aerului

pe lângă o piatră neregulată sau printre penele unei săgeți e foarte complicată, așa încât calculele noastre sunt doar aproximative, mai ales atunci când curgerea aerului devine turbulentă. Există apoi problema specificării precise a condițiilor inițiale. Putem totuși folosi principiile fizice cunoscute pentru a rezolva probleme mai simple – cum ar fi mișcarea planetelor în vid sau curgerea laminară a aerului în jurul corpurilor sferice discoidale – suficient de bine pentru a ne asigura că într-adevăr cunoaștem principiile care guvernează zborul unui proiectil. În același mod, nu putem calcula cursul evoluției biologice, dar cunoaștem destul de bine principiile care o guvernează.

Aceasta e o distincție importantă, care tinde să fie ignorată în disputele privind semnificația sau existența legilor ultime ale naturii. Când spunem că un adevăr îl explică pe altul – de exemplu că principiile fizice (legile mecanicii cuantice) care guvernează electronii în câmpuri electrice explică legile chimiei – nu înțelegem neapărat prin asta că putem deduce adevărurile pe care afirmăm că le-am explicat. Uneori putem duce până la capăt deducția, cum e cazul chimiei moleculei simple de hidrogen. Dar uneori problema e pur și simplu prea complicată. Referindu-ne astfel la explicațiile științifice, nu ne gândim la ceea ce deduc savanții în realitate, ci la o necesitate intrinsecă naturii. De exemplu, chiar și înainte ca fizicienii și astronomii din secolul XIX să învețe cum să țină cont de atracția reciprocă a planetelor într-un calcul precis al mișcării lor, ei erau destul de siguri că planetele se mișcă așa cum se mișcă fiindcă sunt guvernate de legile lui Newton, sau de alte legi mai precise pe care legile lui Newton le aproximează. În zilele noastre, chiar dacă nu putem prezice tot ce pot observa chimiștii, credem că în reacțiile chimice comportamentul atomilor e dictat de principiile fizice care guvernează electronii, iar forțele electrice din interiorul atomilor nu lasă atomilor libertatea de a se comporta în alt fel.

Acesta e un aspect delicat, în parte fiindcă e bizar să vorbești despre un fapt care îl explică pe altul fără ca cineva să încheie cu adevărat șirul deducțiilor. Cred însă că suntem nevoiți să vorbim astfel pentru că tocmai *asta* e știința: descoperirea explicațiilor încorporate în structura logică a naturii. Desigur, încrederea noastră că deținem explicația corectă sporește când putem într-adevăr

efectua anumite calcule și compara rezultatele cu observațiile: dacă nu pentru chimia proteinelor, cel puțin pentru chimia hidrogenului.

Deși grecii nu urmăreau, ca noi, înțelegerea cantitativă a naturii, raționamentul precis cantitativ nu era necunoscut lumii antice. De milenii oamenii cunoșteau regulile aritmeticii și ale geometriei plane și periodicitatea mișcării Soarelui, Lunii și stelelor, ba chiar și subtilități cum ar fi precesia echinocțiilor. Apoi, după Aristotel, matematica a înflorit în perioada elenistică ce se întinde de la cuceririle lui Alexandru, discipolul lui Aristotel, până la subjugarea lumii grecești de către Roma. Pe când, student fiind, audiam cursurile de filozofie, mă deranja să aud că filozofi ca Tales sau Democrit erau numiți fizicieni; când am ajuns însă la marile figuri elenistice, la Arhimede din Siracuza care a descoperit legile plutirii sau la Eratostene din Alexandria care a măsurat circumferința Pământului, m-am simțit printre oameni de știință în toată puterea cuvântului. Nimic asemănător științei elenistice n-a apărut în lume până la nașterea științei moderne în Europa secolului al XVII-lea.

Cu tot geniul lor, filozofii naturii din epoca elenistică n-au ajuns la ideea unui corp de legi care să guverneze cu precizie *întreaga* natură. Într-adevăr, cuvântul „lege“ a fost rareori folosit în Antichitate (și niciodată de Aristotel) în afara sensului său original de lege omenească sau divină care guvernează comportamentul oamenilor. (E drept că termenul „astronomie“ derivă din cuvintele grecești *astron*—stea și *nomos*—lege, dar acesta a fost mai rar folosit în Antichitate pentru a desemna știința cerului decât cuvântul „astrologie“.) Abia în secolul al XVII-lea, odată cu Galilei, Kepler și Descartes, găsim noțiunea modernă de lege a naturii.

Clasicistul Peter Green pune limitările științei grecești în mare parte pe seama snobismului intelectual constant al grecilor, cu preferința lor pentru static în detrimentul dinamicului și pentru contemplare în detrimentul tehnicii, cu excepția tehnicii militare. Primii trei regi din Alexandria elenistică au încurajat cercetările privind zborului proiectilelor datorită aplicațiilor militare, dar grecilor li s-ar fi părut nefiresc să aplice raționamente precise unui proces atât de banal cum e rostogolirea unei bile pe un plan înclinat, problemă care l-a condus pe Galilei la descoperirea legilor mișcării. Știința modernă își are și ea snobii ei – biologii sunt mai interesați

de gene decât de ciocurile încheieturilor, iar fizicienii preferă să studieze ciocnirile proton-proton la 20 de bilioane de volți decât la 20 de volți. Dar în aceste cazuri e vorba doar de o tactică, bazată pe ideea (adevărată sau falsă) că anumite fenomene se dovedesc a fi mai relevante decât altele; ele nu reflectă convingerea că anumite fenomene sunt mai importante decât altele.

Visul unei teorii finale începe cu adevărat odată cu Isaac Newton. Raționamentul științific cantitativ nu dispăruse niciodată cu totul, iar pe vremea lui Newton fusese deja revitalizat, mai cu seamă de Galilei. Newton însă a putut explica atât de multe lucruri cu legile mișcării și cu legea atracției universale, de la orbitele planetelor și sateliților până la marea și căderea merelor, încât el trebuie să fi fost primul care a sesizat posibilitatea unei teorii cu adevărat cuprinzătoare. Speranțele lui Newton au fost exprimate în prefața primei ediții a măreței sale lucrări *Principia*: „Aș vrea să putem deduce restul fenomenelor naturale [adică fenomenele netratate în *Principia*] prin același tip de raționament cu cel folosit la principiile mecanicii. Căci există multe motive care mă fac să bănuiesc că ele toate ar putea depinde de anumite forțe.“ Douăzeci de ani mai târziu Newton prezintă în altă lucrare a sa, *Optica*, modul în care credea că acest scop ar putea fi atins:

Cele mai mici particule de materie se unesc prin cele mai puternice atracții și alcătuiesc particule mai mari, mai puțin consistente; multe dintre acestea se pot uni și alcătui particule și mai mari, având o consistență și mai scăzută, și așa mai departe în felurite succesiuni, progresia oprindu-se la particulele cele mai mari, de care depind reacțiile chimice și culorile corpurilor naturale și care, unindu-se, alcătuiesc corpuri de dimensiuni sesizabile. Prin urmare, există în natură agenți care pot face ca particulele corpurilor să fie ținute laolaltă prin atracții foarte puternice. Iar sarcina filozofiei experimentale este să le descopere.

Influența copleșitoare a lui Newton a făcut să apară, mai cu seamă în Anglia, un stil caracteristic de explicație științifică: materia e considerată a fi alcătuită din minuscule particule imuabile; particulele interacționează între ele prin intermediul „anumitor forțe“, gravitația fiind doar una dintre ele; cunoscând pozițiile

și vitezele acestor particule la un moment oarecare și știind cum se calculează forțele de interacțiune, se pot folosi legile mișcării pentru a prezice unde se vor afla ele la orice moment din viitor. Și în zilele noastre fizica e deseori predată începătorilor în acest mod. Din păcate, în ciuda succeselor ulterioare ale fizicii în stil newtonian, s-a ajuns într-un punct mort.

La urma urmei, lumea e complexă. Pe măsură ce oamenii de știință din secolele XVIII și XIX făceau noi descoperiri în domeniul chimiei, electricității, luminii și căldurii, posibilitatea unei explicații în stil newtonian trebuie să fi părut tot mai îndepărtată. În particular, pentru a explica reacțiile și afinitățile chimice tratând atomii ca particule newtoniene ce se mișcă sub influența atracțiilor și respingerilor reciproce, fizicienii trebuiau să facă atât de multe presupuneri arbitrare privind atomii și forțele, încât nimic nu putea fi dus cu adevărat la bun sfârșit.

Și totuși, în anii 1890, mulți savanți erau stăpâniți de un straniu sentiment de împlinire. În folclorul științific există o poveste apocrifă despre un fizician care, pe la sfârșitul secolului, a afirmat că fizica era aproape încheiată și că nu mai rămăseseră de făcut decât măsurători pentru a îmbunătăți datele cu câteva zecimale. Povestea pare să-și aibă originea într-o remarcă făcută în 1894 cu ocazia unei conferințe ținute la Universitatea din Chicago de fizicianul experimentator american Albert Michelson: „Deși nu e niciodată prudent să afirmi că viitorul științei fizice nu ne rezervă minuni mai mari decât cele din trecut, pare probabil ca majoritatea marilor principii fundamentale să fi fost deja ferm stabilite, iar progresele ulterioare vor rezulta în principal din aplicarea riguroasă a acestor principii la toate fenomenele pe care le observăm. [...] Un eminent fizician a remarcat că adevărurile viitoare ale științei fizicii trebuie căutate la cea de-a șasea zecimală.” Un alt experimentator american, Robert Andrews Millikan, a asistat la conferința lui Michelson de la Chicago și a bănuț că „eminentul fizician” la care se referea acesta era celebrul savant scoțian William Thomson, Lord Kelvin. Un prieten mi-a povestit că pe vremea studenției sale la Cambridge, pe la sfârșitul anilor '40, era frecvent citată opinia lui Kelvin potrivit căreia nimic nou nu mai

era de descoperit în fizică, iar tot ce rămânea de făcut erau măsurători din ce în ce mai precise.

Nu am reușit să găesc această remarcă în discursurile lui Kelvin, dar există o mulțime de alte dovezi privind această extrem de răspândită, fără a fi totuși universală, automulțumire științifică de la sfârșitul secolului XIX. Când tânărul Max Planck a intrat la Universitatea din München în 1875, profesorul de fizică Philip Jolly l-a sfătuit să nu studieze știința. Jolly credea că nu mai rămăsese nimic de descoperit. Millikan a primit un sfat asemănător: „În 1894“, își amintea el, „locuiam într-un apartament la etajul cinci, pe Strada 64, într-un bloc din vestul Broadway-ului, împreună cu alți patru absolvenți de la Columbia, unul medic, iar ceilalți trei sociologi și politologi, și mă șicanau în permanență pentru că mă agățasem de un «subiect mort», «terminat», precum fizica, în timp ce domeniul nou, «viu», al științelor sociale, tocmai se deschidea.“

Deseori asemenea exemple privind sentimentul de suficiență din secolul XIX ne sunt citate ca semnale de alarmă nouă, celor care în secolul XX îndrăznim să vorbim despre o teorie finală, dar sensul acestor remarci e deturnat. Michelson, Jolly și colegii de cameră ai lui Millikan nu se gândeau că natura atracției chimice fusese explicată de fizicieni – și cu atât mai puțin că mecanismul eredității fusese explicat de chimiști. Ei renunțaseră pur și simplu la vechiul vis al lui Newton și al urmașilor săi de a înțelege chimia și toate celelalte științe în termenii forțelor fizice; pentru ei, chimia și fizica deveniseră științe cu statut egal, fiecare ajungând în mod separat să fie aproape încheiată. Acest sentiment de împlinire în știința de la sfârșitul secolului XIX nu provenea decât din suficiența legată de o ambiție mai mică.

Dar lucrurile aveau să se schimbe rapid. Pentru fizicieni, secolul XX începe în 1895, cu neașteptata descoperire a razelor X de către Wilhelm Röntgen. Razele X nu erau în sine atât de importante, însă descoperirea i-a făcut pe fizicieni să creadă că rămâneau multe lucruri noi de descoperit, în special prin studiul diverselor tipuri de radiații. Iar descoperirile s-au succedat într-adevăr într-un ritm accelerat. În 1896, la Paris, Henri Becquerel descoperă radioactivitatea. În 1897, la Cambridge, J.J. Thomson măsoară devierea razelor catodice în câmpurile electric și magnetic și interpretează

rezultatele cu ajutorul unei particule fundamentale, electronul, prezent în întreaga materie, nu doar în radiațiile catodice. În 1905, la Berna, Albert Einstein (fără să fie angajat la o universitate) prezintă o nouă perspectivă asupra spațiului și timpului în teoria relativității restrânse, sugerează un nou mod de a demonstra existența atomilor și interpretează cercetările anterioare ale lui Max Planck asupra radiației termice cu ajutorul unei noi particule elementare, particula de lumină numită ulterior foton. Ceva mai târziu, în 1911, Ernest Rutherford folosește rezultatele experimentelor cu elemente radioactive din laboratorul său de la Manchester pentru a arăta că atomii sunt alcătuiți din mici nuclee masive înconjurate de nori de electroni. Iar în 1913 danezul Niels Bohr folosește acest model atomic și ideea de foton a lui Einstein pentru a explica spectrul celui mai simplu atom, cel de hidrogen. Suficiența face loc entuziasmului. Fizicienii încep să simtă că o teorie finală, unind cel puțin întreaga știință a fizicii, ar putea fi curând găsită.

Deja în 1902 Michelson, cel care dovedise în trecut atâta suficiență, declara: „Nu e departe ziua când liniile convergente din multe domenii ale gândirii aparent îndepărtate se vor întâlni pe [...] un teren comun. Atunci natura atomilor și a forțelor ce joacă un rol în legăturile lor chimice; interacțiunile dintre acești atomi și eterul nediferențiat, așa cum se manifestă el în fenomenul luminii și al electricității; structurile moleculelor și sistemelor moleculare ale căror unități sunt atomii; explicația coeziunii, elasticității și gravitației – toate acestea vor fi așezate într-un corp unic și compact al cunoașterii științifice.” Dacă înainte Michelson crezuse că fizica era deja încheiată pentru că nu se așteptase ca fizica să explice chimia, acum el întrevădea un alt fel de încheiere în viitorul apropiat, cuprinzând deopotrivă chimia și fizica.

Era însă prematur. Visul unei teorii finale unificatoare a început cu adevărat să prindă contur pe la mijlocul anilor '20, odată cu descoperirea mecanicii cuantice. Aceasta a reprezentat un cadru nou și neobișnuit pentru fizică prin folosirea funcțiilor de undă și probabilităților în locul particulelor și forțelor din mecanica newtoniană. Dintr-o dată, mecanica cuantică a făcut cu puțință nu doar calcularea proprietăților pentru atomii individuali și în interacție cu radiația, ci și pentru atomii combinați în molecule. Devenise

în fine limpede că fenomenele chimice sunt determinate de interacțiile electronilor și nucleelor atomice.

Asta nu înseamnă că predarea cursurilor de chimie a început să fie încredințată profesorilor de fizică sau că Societatea Americană de Chimie a cerut să fie absorbită în Societatea Americană de Fizică. Folosirea ecuațiilor mecanicii cuantice este destul de dificilă în cazul calculului tăriei legăturii dintre doi atomi de hidrogen în cea mai simplă moleculă de hidrogen; este nevoie de experiența și perspicacitatea chimiștilor pentru a studia molecule complicate, în special moleculele foarte complicate întâlnite în biologie, și modul în care acestea reacționează în diverse condiții. Succesul mecanicii cuantice în calculul proprietăților moleculelor foarte simple a arătat însă limpede că legile chimiei sunt determinate de legile fizicii. Paul Dirac, unul dintre fondatorii mecanicii cuantice moderne, anunța triumfător în 1929 că „legile fizice fundamentale necesare teoriei matematice a unei mari părți a fizicii și a întregii chimii sunt astfel complet cunoscute, singura dificultate fiind că aplicarea acestor legi conduce la ecuații mult prea complicate pentru a fi rezolvate“.

Curând a apărut o nouă problemă stranie. Primele calcule din mecanica cuantică pentru energiile atomice au condus la rezultate în bună concordanță cu experimentele. Când însă mecanica cuantică a fost aplicată nu doar electronilor din atomi, ci și câmpurilor electrice și magnetice pe care aceștia le produc, a rezultat că atomul are o energie infinită! Alți infiniți au apărut în alte calcule, iar vreme de patru decenii acest rezultat absurd părea cel mai mare obstacol în calea progresului fizicii. În cele din urmă, problema infiniților s-a dovedit a nu fi un dezastru, ci unul din cele mai întemeiate motive de optimism în perspectiva de a ajunge la o teorie finală. Când masele, sarcinile electrice și alte constante sunt atent definite, toți infiniții se anulează, dar *numai* în anumite tipuri de teorii. Am putea fi astfel conduși pe cale matematică spre întreaga teorie finală sau spre o parte a ei, ca singur mod de a evita acești infiniți. Într-adevăr, noua teorie ezoterică a corzilor s-ar putea să fi oferit deja unicul mod de evitare a infiniților când punem de acord relativitatea (inclusiv relativitatea generală, teoria gravitației formulată de

Einstein) cu mecanica cuantică. Dacă așa stau lucrurile, aceasta va constitui o parte importantă a oricărei teorii finale.

Nu vreau să spun aici că teoria finală va fi dedusă pe căi pur matematice. La urma urmei, de ce am crede că relativitatea sau mecanica cuantică sunt inevitabile din punct de vedere logic? Lucrul cel mai bun care putem spera spera să se întâmple ar fi, în opinia mea, să reușim să identificăm teoria finală prin condiția ca ea să fie atât de rigidă încât să nu poată fi deformată într-o teorie ușor diferită fără a introduce absurdități logice cum sunt energiile infinite.

Un alt motiv de optimism ține de faptul că progresul în fizică e deseori călăuzit de judecăți ce nu pot fi numite decât estetice. E un lucru foarte straniu. De ce senzația unui fizician că o teorie e mai frumoasă decât alta ar fi un ghid util în cercetarea științifică? Există mai multe motive, dar unul dintre ele e legat de fizica particulelor elementare: frumusețea teoriilor noastre actuale ar putea fi „doar un vis“ al acelei frumuseți care ne așteaptă în teoria finală.

În secolul nostru, Albert Einstein a fost cel care a urmărit în modul cel mai explicit scopul unei teorii finale. După cum spune biograful său, Abraham Pais, „Einstein este o figură tipică a Vechiului Testament, cu o atitudine care amintește de Iehova – există o lege, iar ea trebuie găsită.“ Ultimii treizeci de ani ai vieții lui Einstein au fost în mare parte dedicați căutării unei așa-numite teorii unificate a câmpurilor, care ar uni teoria electromagnetismului a lui James Clerk Maxwell cu teoria relativității generale, teoria gravitației elaborată de Einstein. Încercarea lui Einstein nu a fost încununată de succes, iar acum ne putem da seama că era greșit orientată. Nu numai că Einstein respingea mecanica cuantică, dar obiectivul său era prea îngust. Electromagnetismul și gravitația se întâmplă să fie singurele forțe fundamentale sesizabile în viața de zi cu zi (și singurele forțe cunoscute pe când Einstein era tânăr), însă există și alte tipuri de forțe în natură, forțele nucleare slabă și tare. Într-adevăr, progresul înregistrat în direcția unificării a fost reprezentat de unificarea teoriei forței electromagnetice a lui Maxwell cu teoria forței nucleare slabe, nu cu teoria gravitației, la care problema înfiniților era mult mai greu de rezolvat. Scopul lui Einstein este însă același cu cel din zilele noastre: căutarea unei teorii finale.

Când vorbești despre teoria finală, trezești furia anumitor filozofi și oameni de știință. Poți fi acuzat de lucruri cumplite, cum ar fi reduționism sau chiar imperialismul fizicii. Aceasta e în parte o reacție la tot felul de prostii care pot fi puse pe seama teoriei finale, de pildă faptul că descoperirea unei teorii finale în fizică ar reprezenta sfârșitul științei. Evident, o teorie finală n-ar pune capăt cercetării științifice, nici cercetării științifice pure, și nici măcar cercetării pure în fizică. Fenomene minunate, de la turbulență până la gândire, vor necesita în continuare explicații, indiferent ce teorie finală e descoperită. Descoperirea unei teorii finale în fizică nu va conduce neapărat la progrese în înțelegerea acestor fenomene (deși în unele cazuri s-ar putea s-o facă). O teorie finală va fi finală într-un singur sens – va reprezenta sfârșitul unui anumit tip de știință, vechea căutare a acelor principii care nu pot fi explicate făcând apel la principii mai profunde.

CAPITOLUL II

Despre o bucată de cretă

Bufonul: [...] *Știi pentru ce cele șapte stele sunt numai șapte?*

Lear: *Pentru că nu sunt opt?*

Bufonul: *Bravo, ai stofă de bufon!*

WILLIAM SHAKESPEARE, *Regele Lear*

Oamenii de știință au descoperit multe lucruri stranii și multe lucruri frumoase. Dar probabil cel mai frumos și mai straniu lucru pe care l-au descoperit este însăși structura științei. Descoperirile noastre științifice nu sunt fapte independente și izolate; o generalizare științifică își găsește explicația în alta, care la rândul ei este explicată de o alta. Urmărind aceste săgeți ale explicației spre sursa lor, am descoperit o structură convergentă izbitoare – poate cel mai profund lucru pe care l-am aflat până acum despre univers.

Să considerăm o bucată de cretă. Creta este o substanță familiară tuturor (în special fizicienilor, care vorbesc între ei în fața tablei de scris), dar am ales creta drept exemplu pentru că a făcut obiectul unei faimoase polemici din istoria științei. În 1868, Asociația Britanică își ținea întrunirea anuală în marea catedrală din Norwich, în estul Angliei. Au fost momente emoționante pentru savanții și cărturarii adunați acolo. Atenția publicului a fost atrasă de știință nu numai datorită contribuției sale tot mai importante la tehnologia vremii, dar mai ales fiindcă știința schimbase felul în care oamenii priveau lumea și locul lor în ea. În primul rând, publicarea cu nouă ani în urmă a lucrării lui Darwin *Originea speciilor* adusese știința într-o opoziție clară cu biserica, dominantă la acea epocă. La întrunire a fost prezent Thomas Henry Huxley – distins anatomist și vehement polemist, poreclit de contemporani „Buldogul lui Darwin“. După cum obișnuia, Huxley s-a folosit de ocazie pentru

a vorbi muncitorilor din oraș. Titlul prelegerii sale a fost „Despre o bucată de cretă“.

Ni-l putem închipui pe Huxley stând la tribună, ținând în mână o bucată de cretă extrasă probabil din zăcămintele calcaroase din vecinătatea orașului sau împrumutată de la vreun profesor sau tâmplar binevoitor. A început prin a arăta cum straturile de calcar, adânci de sute de metri, se întind nu numai sub o mare parte din suprafața Angliei, dar și dedesubtul Europei și Levantului, până în Asia Centrală. În principiu, calcarul este o substanță chimică simplă, var nestins, sau în termeni moderni carbonat de calciu, dar examinarea microscopică arată că e format din nenumărate cochilii, fosile de animale minuscule care populau vechile mări ce acopereau cândva Europa. Plin de însuflețire, Huxley a povestit cum milioane de ani aceste mici cadavre au fost purtate de curenți pe fundul mării, pentru a fi comprimate și transformate în calcar, și cum printre aceste bucăți de calcar s-au găsit fosilele unor animale mai mari asemănătoare crocodililor, animale ce se deosebesc tot mai mult de urmașii lor actuali pe măsură ce coborâm mai adânc în straturile de calcar, iar aceasta era mărturia unei evoluții de milioane de ani.

Huxley încerca să-i convingă pe muncitorii din Norwich că lumea este cu mult mai veche decât cei șase mii de ani atribuiți de Biblie, și că noi și noi specii de viețuitoare au apărut și au evoluat de-a lungul timpului. Aceste fapte sunt acum bine stabilite – nici un om cu oarecare educație științifică nu s-ar mai îndoi de vârsta înaintată a Pământului sau de realitatea evoluției. Ceea ce vreau eu să spun aici nu se referă la o anume problemă științifică, ci la modul în care toate acestea se leagă între ele. În acest scop am să pornesc, la fel ca Huxley, de la o bucată de cretă.

Creta este albă. *De ce?* Un răspuns imediat ar fi că e albă fiindcă nu are o altă culoare. Acest răspuns ar fi pe placul bufonului regelui Lear, dar de fapt nu e prea departe de adevăr. Încă de pe vremea lui Huxley se știa că fiecărei culori a curcubeului îi corespunde o anumită lungime de undă – lungimi de undă mai mari spre capătul roșu al spectrului și mai scurte spre cel albastru sau violet. Lumina albă era considerată un amestec de lumini de diferite lungimi de undă. Când lumina cade pe o substanță opacă precum creta, doar o parte din ea e reflectată, restul fiind absorbit. O substanță

de o anumită culoare – cum ar fi compuşii albastru-verzui ai cuprului (de exemplu, fosfații de cupru și aluminiu din turcoaz) sau compuşii violeti ai potasiului – are acea culoare fiindcă substanța tinde să absoarbă mai puternic lumina cu anumite lungimi de undă; culoarea pe care o vedem în lumina reflectată de substanță este cea asociată lungimilor de undă care *nu* sunt puternic absorbite. În cazul carbonatului de calciu din care e compusă creta, sunt puternic absorbite doar componentele infraroșii și ultraviolete ale luminii, care sunt oricum invizibile. Deci lumina reflectată de o bucată de cretă are aproape aceeași distribuție a lungimilor de undă vizibile ca lumina care cade pe ea. Astfel apare senzația de alb, fie că e vorba de nori, de zăpadă sau de cretă.

De ce? De ce anumite substanțe absorb puternic lumina vizibilă la anumite lungimi de undă, iar la altele nu? Răspunsul se leagă de energiile atomilor și ale luminii. Acest lucru a început să fie înțeles odată cu lucrările lui Albert Einstein și Niels Bohr din primele două decenii ale secolului. În 1905, Einstein a înțeles pentru prima dată că o rază de lumină este un flux alcătuit dintr-un număr imens de particule numite *fotoni*. Fotonii nu au masă sau sarcină electrică, dar fiecare are o anumită energie, invers proporțională cu lungimea de undă a luminii. Bohr a emis în 1913 ipoteza că atomii și moleculele pot exista doar în anumite *stări*, configurații stabile având energii bine definite. Deși atomii sunt deseori asemuiți unor mici sisteme solare, există o diferență fundamentală. În sistemul solar, oricărei planete i s-ar putea crește sau scădea puțin energia, mutând-o ceva mai aproape sau mai departe de Soare, dar stările unui atom sunt *discrete* – nu putem modifica energiile atomilor decât cu cantități bine definite. În mod normal, un atom sau o moleculă se află în starea cu energia cea mai joasă. Când absoarbe lumină, atomul sau molecula sare dintr-o stare de energie mai joasă într-una de energie mai înaltă (și invers când emite lumină). Considerate împreună, aceste idei ale lui Einstein și Bohr ne arată că lumina poate fi absorbită de un atom sau o moleculă numai dacă lungimea de undă a luminii are anumite valori. Acestea sunt lungimile de undă care corespund energiilor fotonului, riguros egale cu diferența de energie dintre starea normală și una din stările de energie mai înaltă. Altminteri energia

nu s-ar conserva când fotonul este absorbit de atom sau moleculă. Compușii tipici ai cuprului sunt albastru-verzui deoarece există o anumită stare a atomului de cupru având energia cu 2 volți* mai mare decât energia stării normale a atomului și este extrem de ușor pentru atom să sară pe nivelul cu energie mai înaltă prin absorbția unui foton cu o energie de 2 volți. Un asemenea foton are o lungime de undă de 0,62 microni, corespunzând unei culori roșu-portocaliu, astfel încât absorbția acestor fotoni face ca lumina reflectată să fie verde-albăstrui. (Acesta nu este doar un mod complicat de a afirma că acești compuși sunt verzi-albăștrui; întâlnim aceeași structură a energiilor atomice și dacă cedăm energie atomului de cupru pe alte căi, de pildă cu un fascicul de electroni.) Creta e albă deoarece moleculele din care e alcătuită se întâmplă să nu aibă stări ușor de atins prin absorbție de fotoni corespunzând unor lungimi de undă vizibile.

De ce? De ce atomii și moleculele se află în stări discrete, fiecare cu o energie bine definită? De ce energia ia exact aceste valori? De ce lumina e alcătuită din particule distincte, fiecare cu o energie invers proporțională cu lungimea de undă a luminii? Și de ce anumite stări ale atomilor sau moleculelor sunt extrem de ușor de atins prin absorbția fotonilor? Nu a fost posibilă înțelegerea acestor proprietăți ale luminii, atomilor și moleculelor până la jumătatea anilor '20, când a apărut o nouă ramură a fizicii, mecanica cuantică. Particulele dintr-un atom sau dintr-o moleculă sunt descrise în mecanica cuantică prin așa-numita funcție de undă. Funcția de undă se comportă asemănător undei luminoase sau sonore, dar amplitudinea ei (de fapt pătratul amplitudinii) corespunde probabilității de a găsi particulele într-o poziție dată. După cum aerul dintr-un tub de orgă poate vibra doar în anumite moduri precise de vibrație, fiecare cu propria lui lungime de undă, la fel și funcția de undă a particulelor dintr-un atom sau dintr-o moleculă poate apărea doar în anumite moduri sau stări cuantice,

* Voltul, ca unitate de energie, este egal cu energia cedată unui electron la trecerea curentului electric printr-un conductor conectat la bornele unei baterii de 1 volt. Când e folosit cu acest sens, ar fi mai corectă denumirea de „electron-volt“, dar, după cum obișnuiesc fizicienii, îl voi numi volt. (*N.a.*)

fiecare cu propria sa energie. Când ecuațiile mecanicii cuantice sunt aplicate atomului de cupru, se dovedește că unul dintre electronii de pe o orbită exterioară de energie înaltă a atomului e slab legat și poate sări ușor prin absorbția luminii vizibile pe următoarea orbită. Calculele mecanicii cuantice arată că diferența dintre energiile atomului în aceste două stări este de 2 volți, exact energia unui foton corespunzând luminii roșii-portocalii*. Pe de altă parte, moleculele de carbonat de calciu dintr-o bucată de cretă nu au asemenea electroni liberi care să absoarbă fotoni cu o anumită lungime de undă. Cât privește fotonii, proprietățile lor se explică aplicând în același mod principiile mecanicii cuantice în cazul luminii. Rezultă astfel că lumina, ca și atomii, se poate afla numai în anumite stări cuantice cu energii bine definite. De exemplu, lumina roșie-portocalie cu o lungime de undă de 0,62 microni poate exista doar în stări cu energii de 0, 2, 4, 6 volți și așa mai departe, ceea ce înseamnă stări cu 0, 1, 2, 3 sau mai mulți fotoni, fiecare foton având o energie de exact 2 volți.

De ce? De ce ecuațiile mecanicii cuantice care guvernează particulele din atomi sunt așa cum sunt? De ce materia e alcătuită din aceste particule, electronii și nucleele atomice? Și, la urma urmei, de ce există lumina? Multe din aceste lucruri păreau destul de misterioase în anii 1920–1930, când mecanica cuantică a fost aplicată pentru prima dată atomilor și luminii, și au fost înțelese ceva mai bine în ultimii cincizeci de ani, odată cu impunerea a ceea ce numim *modelul standard* al forțelor și particulelor elementare. O premisă esențială pentru această nouă înțelegere a fost reconcilierea la care s-a ajuns în anii '40 între mecanica cuantică și cealaltă mare revoluție din fizica secolului XX, teoria relativității a lui Einstein. Principiile relativității sunt aproape incompatibile cu cele ale mecanicii cuantice, putând coexista doar într-o clasă restrânsă de teorii. În mecanica cuantică nerelativistă a anilor '20 se puteau imagina aproape orice fel de interacții între electroni și nuclee, dar, după cum vom vedea, acest lucru nu mai e valabil

* Într-un metal, acești electroni externi părăsesc atomii individuali și se mișcă printre ei; deci cuprul metalic nu prezintă tendința de a absorbi fotoni corespunzând luminii portocalii, de aceea nu este verde-albăstrui. (*N.a.*)

într-o teorie relativistă: forțele dintre particule pot lua naștere doar prin schimbul altor particule. Mai mult, toate aceste particule sunt pachete de energie, sau *cuante*, ale diferitelor tipuri de câmpuri. Un câmp, cum este cel electric sau cel magnetic, e un fel de tensiune în spațiu, asemănătoare diferitelor tensiuni ce pot apărea într-un corp solid, dar câmpul este o tensiune în spațiul însuși. Există un anumit tip de câmp pentru fiecare specie de particulă elementară; există în modelul standard un câmp electronic ale cărui cuante sunt electronii; există un câmp electromagnetic (constând din câmpurile electric și magnetic) ale cărui cuante sunt fotonii; nu există un câmp pentru nucleeele atomice sau pentru particulele din care e compus nucleul (protoni și neutroni), dar există câmpuri pentru diferite tipuri de particule numite cuarci, din care sunt alcătuiți protonul și neutronul; mai există apoi și alte câteva câmpuri la care nu mă voi referi acum. Ecuațiile unei teorii a câmpului cum este modelul standard nu operează cu particule, ci cu câmpuri; particulele apar ca manifestări ale acestor câmpuri. Materia obișnuită e alcătuită din electroni, protoni și neutroni pur și simplu pentru că toate celelalte particule grele sunt extrem de instabile. Modelul standard reprezintă o explicație fiindcă nu e doar un aranjament ingenios de elemente dispartate menit să funcționeze cumva. Dimpotrivă, structura modelului standard e în mare măsură fixată odată ce precizăm câmpurile pe care trebuie să le conțină și principiile generale (așa cum sunt principiile relativității și cele ale mecanicii cuantice) care guvernează interacțiile lor.

De ce? De ce este lumea constituită exact din aceste câmpuri: câmpurile cuarcilor, electronului, fotonului și așa mai departe? De ce au ele proprietățile presupuse de modelul standard? Și, în fond, de ce ascultă natura de principiile relativității și mecanicii cuantice? Îmi pare rău – aceste întrebări sunt încă fără răspuns. Vorbind despre stadiul actual al fizicii, teoreticianul David Gross de la Princeton dădea o listă a întrebărilor deschise: „Acum, când înțelegem cum funcționează, începem să ne întrebăm de ce există cuarci și leptoni, de ce structura materiei e replicată în trei generații de cuarci și leptoni, de ce toate forțele se datorează unor simetrii locale de etalonare? De ce, de ce, de ce?” (Termenii folosiți în întrebările lui Gross sunt explicați în capitolele următoare.) Speranța de a găsi

răspunsuri la aceste întrebări face ca fizica particulelor elementare să fie atât de interesantă.

Întrebarea „de ce“ e extrem de alunecoasă. Filozoful Ernest Nagel dă zece exemple de întrebări în care „de ce“ e folosit în zece sensuri diferite, de pildă: „De ce plutește gheața pe apă?“, „De ce a plănuit Casius asasinarea lui Cezar?“ și „De ce au oamenii plămâni?“ Alte exemple în care „de ce“ este folosit cu alte sensuri ne vin imediat în minte: „De ce m-am născut?“ Aici „de ce“ e folosit oarecum la fel ca în întrebarea „De ce plutește gheața pe apă?“ și nu se referă la vreun scop conștient.

Rămâne oricum o sarcină dificilă să spunem exact ce facem când răspundem la o asemenea întrebare. Din fericire, nu avem cu adevărat nevoie de asta. Explicația științifică e o sursă de plăcere, la fel ca dragostea sau arta. Cea mai bună cale de a înțelege natura explicației științifice este să trăiești acel fior pe care îl simți atunci când cineva (de preferință tu însuși) a reușit să explice un anumit lucru. Nu vreau să spun că explicația științifică poate fi urmărită fără nici o constrângere, nu mai mult decât dragostea sau arta. În toate cele trei cazuri există un criteriu al adevărului care trebuie respectat, deși, bineînțeles, adevărul are semnificații diferite în știință, dragoste sau artă. De asemenea, nu vreau să spun că nu ar fi interesantă încercarea de a formula o descriere generală a felului în care se face știință, însă aceasta nu e cu adevărat necesară în activitatea științifică, nu mai mult decât în dragoste sau în artă.

După cum spuneam, explicația științifică este în mod evident legată de deducerea unui adevăr din altul, dar explicația are ceva în plus și ceva în minus față de deducție. Simpla deducere a unei afirmații din alta nu reprezintă neapărat o explicație, ca în cazul acelor afirmații care pot fi deduse una din alta. Einstein a dedus existența fotonilor în 1905 din teoria radiației termice propusă cu cinci ani înainte de Max Planck; nouăsprezece ani mai târziu, Satyendra Nath Bose a arătat că teoria lui Planck poate fi dedusă din teoria fotonilor a lui Einstein. Explicația, spre deosebire de deducție, are un sens unic al *direcției*. Simțim clar că teoria fonică a luminii este mai profundă decât orice afirmație privind radiația termică și de aceea constituie explicația proprietăților radiației termice. Și, în același mod, deși Newton a dedus faimoasele sale

legi ale mișcării în parte din legile anterioare ale lui Kepler care descriu mișcarea planetelor sistemului solar, putem spune că legile lui Newton le explică pe cele ale lui Kepler, și nu invers.

Dacă vorbești despre adevăruri mai profunde stârnești iritarea filozofilor. Putem spune că mai profunde sunt adevărurile care într-un anume sens sunt mai comprehensive, dar și în această privință e greu să fii precis. Oamenii de știință s-ar afla însă într-o mare încurcătură dacă ar trebui să se limiteze la noțiunile satisfăcătoare formulate de filozofi. Nici un fizician adevărat nu se îndoiește că legile lui Newton sunt mai profunde decât cele ale lui Kepler sau că teoria fotonilor a lui Einstein e mai profundă decât teoria radiației termice a lui Planck.

O explicație științifică poate fi uneori mai puțin decât o deducție, fiindcă putem spune că un fapt e explicat de un anumit principiu chiar dacă nu îl putem deduce din acel principiu. Folosind regulile mecanicii cuantice *putem* deduce diferite proprietăți ale atomilor și moleculelor simple și putem chiar estima nivelele energetice ale moleculelor complicate, cum ar fi moleculele de carbonat de calciu din cretă. Chimistul Henry Shaefer de la Berkeley spunea: „Atunci când metode teoretice sofisticate sunt aplicate în mod inteligent la numeroase probleme implicând moleculele mari, cum ar fi naftalina, rezultatele pot fi considerate la fel ca experimentele demne de încredere.” Dar în realitate nimeni nu rezolvă ecuațiile mecanicii cuantice pentru a deduce în detaliu funcția de undă sau energia exactă a moleculelor cu adevărat complicate cum sunt proteinele. Cu toate acestea, nu avem nici o îndoială că regulile mecanicii cuantice „explică” proprietățile unor asemenea molecule. Aceasta se datorează în parte faptului că putem folosi mecanica cuantică pentru a deduce în detaliu proprietățile sistemelor mai simple cum sunt moleculele de hidrogen, și de asemenea faptului că avem la dispoziție reguli matematice care ne-ar permite să calculăm toate proprietățile oricărei molecule cu orice precizie dorim dacă am avea un calculator suficient de mare și suficient timp pentru calcul.

Putem chiar spune că un anumit lucru e explicat deși nu avem nici o garanție că îl vom putea vreodată deduce. În momentul de față nu știm să folosim modelul standard al particulelor elementare pentru a calcula în detaliu proprietățile nucleelor atomice și

nu suntem siguri că vom ști vreodată să facem aceste calcule, chiar dacă am avea la dispoziție o putere de calcul nelimitată. (Aceasta fiindcă forțele din nucleu sunt prea puternice pentru a permite aplicarea acelor tehnici de calcul folosite la atomi sau molecule.) Și totuși nu avem nici o îndoială că nucleeele atomice au proprietățile pe care le au datorită principiilor cunoscute ale modelului standard. Acest „datorită“ nu are nici o legătură cu capacitatea noastră de a deduce realmente un anumit lucru, ci reflectă perspectiva noastră asupra ordinii din natură.

Negând însăși posibilitatea explicării oricărui fapt pe baza oricărui alt fapt, Ludwig Wittgenstein ne previne că „la baza întregii perspective moderne asupra lumii se află iluzia că așa-numitele legi ale naturii sunt explicația fenomenelor naturale“. Asemenea avertismente mă lasă rece. Să spui unui fizician că legile naturii nu sunt explicații ale fenomenelor naturale este ca și cum ai spune unui tigru aflat în căutarea prăzii că tot vânatul nu e decât iarbă. Faptul că noi, oamenii de știință, nu știm să exprimăm ceea ce facem în căutarea explicațiilor științifice într-un mod pe care și filozofii să-l aprobe nu înseamnă că ceea ce facem e lipsit de valoare. Filozofii de profesie ne-ar putea ajuta să înțelegem ce facem, dar noi vom continua cu sau fără ajutorul lor.

Am putea urmări un șir similar de „de ce“-uri pentru fiecare proprietate fizică a cretei – fragilitatea, densitatea, rezistența electrică. Dar haideți să încercăm să intrăm în labirintul explicațiilor pe o altă poartă – considerând chimia cretei. După cum spunea Huxley, creta este în cea mai mare parte carbonat de var sau, în termeni moderni, carbonat de calciu. Huxley nu a spus acest lucru, dar știa probabil că această substanță e alcătuită din elementele calciu, carbon și oxigen, în raportul fix (în greutate) de 40%, 12% și, respectiv, 48%.

De ce? De ce există un compus chimic alcătuit din calciu, carbon și oxigen exact în acest raport, și nu multe altele, cu numeroase alte rapoarte? Răspunsul a fost găsit de chimiștii din secolul XIX cu ajutorul unei teorii a atomilor, înainte de apariția vreunei dovezi experimentale directe privind existența atomilor. Greutățile atomilor de calciu, carbon și oxigen sunt în raportul 40:12:16, iar o moleculă de carbonat de calciu e alcătuită dintr-un atom de calciu, un atom de carbon și *trei* atomi de oxigen, astfel

încât greutatea calciului, carbonului și oxigenului în carbonatul de calciu sunt în raportul 40:12:48.

De ce? De ce au atomii diferitelor elemente greutatea pe care le observăm, și de ce sunt moleculele constituite exact dintr-un anumit număr de atomi de fiecare tip? În secolul XIX se știa deja că numărul de atomi de fiecare tip din molecule cum e carbonatul de calciu depinde de sarcinile electrice pe care atomii din moleculă le schimbă între ei. În 1897, J.J. Thomson a descoperit că aceste sarcini electrice sunt purtate de particule încărcate negativ numite electroni, particule care sunt mult mai ușoare decât atomii întregi și curg prin cabluri sub forma curenților electrici obișnuiți. Un element se deosebește de altul doar prin numărul de electroni din atom: unul pentru hidrogen, șase pentru carbon, opt pentru oxigen, douăzeci pentru calciu și așa mai departe. Dacă aplicăm regulile mecanicii cuantice atomilor din care e compusă creta, se vede că atomii de calciu și carbon cedează ușor doi și respectiv patru electroni, iar atomii de oxigen acceptă ușor doi electroni. Astfel, cei trei atomi de oxigen din fiecare moleculă de carbonat de calciu pot accepta cei șase electroni oferiți de un atom de calciu și un atom de carbon: este exact numărul de electroni necesari pentru schimb. Forța electrică produsă prin acest transfer de electroni este cea care menține atomii în moleculă. Ce putem spune despre greutatea atomice? Din cercetările lui Rutherford din 1911 știm că aproape întreaga masă sau greutate a atomului e conținută într-un mic nucleu încărcat pozitiv în jurul căruia orbitează electronii. După o oarecare confuzie, s-a înțeles în sfârșit în anii '30 că nucleeele atomice sunt alcătuite din două tipuri de particule având aproximativ aceeași masă: protonii, cu sarcini electrice pozitive de mărime egală cu sarcina negativă a electronilor, și neutronii, care nu au sarcină. Nucleul de hidrogen e doar un proton. Numărul de protoni trebuie să fie egal cu numărul de electroni pentru a menține atomul neutru din punct de vedere electric, iar neutronii sunt necesari deoarece atracția puternică dintre protoni și neutroni e esențială în menținerea nucleului. Neutronii și protonii au aproape aceeași greutate, iar electronii cântăresc mult mai puțin, astfel încât greutatea unui atom poate fi bine aproximată prin numărul total

de protoni și neutroni din nucleu: unu (un proton) pentru hidrogen, doisprezece pentru carbon, șaisprezece pentru oxigen și patruzeci pentru calciu, corespunzând greutateilor atomice cunoscute dar încă neînțelese pe vremea lui Huxley.

De ce? De ce există neutronul și protonul, unul neutru și celălalt încărcat, ambii cu aproape aceeași masă și mult mai grei decât electronul? De ce se atrag reciproc cu o forță atât de puternică încât formează nuclee atomice de circa o sută de mii de ori mai mici decât atomii înșiși? Explicația o găsim din nou în detaliile actualului model standard al particulelor elementare. Cei mai ușori cuarci se numesc *u* și *d* (de la „up” – sus și „down” – jos) și au sarcinile $+2/3$ și respectiv $-1/3$ (în unități în care sarcina electronului este -1); protonii sunt formați din doi *u* și un *d*, deci au sarcina $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$; neutronii sunt formați dintr-un *u* și doi *d*, deci au sarcina $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$. Masele protonului și neutronului sunt aproape egale pentru că aceste mase provin în principal din forțele tari care țin cuarcii împreună, iar aceste forțe sunt aceleași pentru cuarcii *u* și *d*. Electronul este mult mai ușor deoarece nu resimte aceste forțe tari. Toți acești cuarci și electroni sunt pachete de energie ale diferitelor câmpuri, iar proprietățile lor derivă din proprietățile acestor câmpuri.

Iată-ne ajunși din nou la modelul standard. Într-adevăr, *orice* întrebare legată de proprietățile fizice și chimice ale carbonatului de calciu ne conduce într-un mod asemănător printr-un șir de „de ce”-uri spre același punct de convergență: actuala teorie cuantică a particulelor elementare, modelul standard. Dar cu fizica și chimia e simplu. Cum stau lucrurile într-un domeniu mai dificil, ca biologia?

Bucata noastră de cretă nu e un cristal perfect de carbonat de calciu, dar nu este nici o aglomerare dezordonată de molecule individuale, ca un gaz. După cum explica Huxley în prelegerea sa din Norwich, creta e compusă din scheletele unor animale minuscule care au absorbit sărurile de calciu și dioxidul de carbon din fostele mări și au utilizat aceste substanțe ca materie primă pentru a construi mici cochilii de carbonat de calciu în jurul corpurilor lor moi. E limpede că aceasta era în folosul lor – marea nu este un loc sigur pentru mici bulgări de proteine neprotejați. Dar acest

fapt nu explică de ce plantele și animalele dezvoltă organe cum ar fi cochiliile din carbonat de calciu care le ajută să supraviețuiască; a avea nevoie nu este același lucru cu a obține. Soluția a fost oferită de lucrarea lui Darwin și Wallace pe care Huxley a popularizat-o și apărât-o cu atâta energie. Ființele vii prezintă variații transmisibile ereditare – unele utile, altele nu –, iar acele organisme care posedă variații utile tind să supraviețuiască și să transmită aceste caracteristici progeniturilor. Dar de ce există aceste variații și de ce sunt ele transmisibile? Acest lucru a fost explicat în cele din urmă în anii '50 pe baza structurii unei molecule foarte mari, ADN-ul, care servește drept model pentru asamblarea proteinelor din aminoacizi. Molecula de ADN formează o spirală dublă care stochează informația genetică într-un cod bazat pe șirul de unități chimice de-a lungul celor două lanțuri ale spiralei. Informația genetică e propagată atunci când spirala dublă se desface și fiecare din cele două lanțuri assemblează o copie a sa; variațiile transmisibile apar atunci când anumite accidente perturbă unitățile chimice care alcătuiesc lanțurile spiralei.

Odată ajunși la nivel chimic, restul e relativ simplu. Este adevărat că ADN-ul e prea complicat pentru a permite folosirea ecuațiilor mecanicii cuantice la descrierea structurii sale. Dar structura e înțeleasă destul de bine pe baza regulilor obișnuite ale chimiei, și nimeni nu se îndoiește că folosind un calculator suficient de mare am putea în principiu explica toate proprietățile ADN-lui rezolvând ecuațiile mecanicii cuantice pentru electronii și nucleele câtorva elemente obișnuite, ale căror proprietăți sunt explicate la rândul lor de modelul standard. Ajungem deci din nou la același punct de convergență al săgeților noastre explicative.

Am scris un articol despre o diferență importantă între biologie și științele fizice: elementul istoric. Dacă prin „cretă“ înțelegem „materialul de pe colinele albe din Dover“ sau „acel lucru din mâna lui Huxley“, atunci afirmația conform careia creta este 40% calciu, 12% carbon și 48% oxigen trebuie să-și găsească explicația într-un amestec de universal și istoric, incluzând accidentele care s-au petrecut în istoria planetei noastre sau în viața lui Thomas Huxley.

Propozițiile pe care sperăm să le explicăm în termenii legilor finale ale naturii sunt cele care se referă la universalii*. Un asemenea universal este afirmația că (la temperaturi și presiuni suficient de joase) există un compus chimic alcătuit din exact aceste proporții de calciu, carbon și oxigen. Noi credem că asemenea afirmații sunt adevărate oriunde în univers și la orice moment de timp. În același mod putem formula afirmații universale despre proprietățile ADN-ului, dar faptul că există pe Pământ ființe care folosesc ADN-ul pentru a transmite variații aleatoare de la o generație la alta depinde de anumite accidente istorice: există o planetă numită Pământ; viața și genetica au început cumva; evoluția a avut la dispoziție un timp îndelungat.

Nu numai biologia implică acest element istoric. Același lucru e valabil pentru multe alte științe, de pildă geologia și astronomia. Să presupunem că am lua din nou bucata noastră de cretă și ne-am întreba de ce există suficient calciu, carbon și oxigen aici pe Pământ pentru a furniza materia primă fosilelor care alcătuiesc creta? Răspunsul e simplu – aceste elemente sunt răspândite aproape pretutindeni în univers. Dar de ce se întâmplă acest lucru? Trebuie din nou să facem apel la un amestec de istorie și principii universale. Folosind modelul standard al particulelor elementare, putem urmări destul de bine cursul reacțiilor nucleare în teoria „big bang” standard a universului pentru a deduce că din materia formată în primele câteva minute ale universului aproximativ trei sferturi reprezenta hidrogenul și un sfert heliul, iar alte elemente, în principal cele ușoare, ca litiul, erau prezente doar în mici cantități. Aceasta e materia primă din care s-au format mai târziu elementele grele în stele. Calculele privind șirul reacțiilor nucleare ulterioare din stele arată că elementele produse în cele mai mari cantități sunt cele ale căror nuclee sunt cel mai strâns legate, iar între aceste elemente se numără carbonul, oxigenul și calciul. Stelele au răspândit această materie în mediul interstelar pe diferite căi, prin

* Aici și mai jos, Weinberg are în vedere conceptul de universal din filozofia medievală – o entitate neschimbătoare, precum ideile lui Platon sau formele lui Aristotel. Disputa dintre realiști și nominaliști viza statutul universalilor: au ele o existență reală sau nu? (*N. red.*)

vânturile stelare și exploziile supernovelor, iar în acest mediu bogat în constituenți ai cretei s-au format stelele din generația a doua, precum Soarele, și planetele lor. Dar acest scenariu depinde de încă o presupunere istorică – faptul că a existat un big bang mai mult sau mai puțin omogen, cu aproximativ zece miliarde de fotoni pentru fiecare cuarc. Diferitele teorii cosmologice speculative fac eforturi pentru a explica această presupunere, dar aceste teorii se bazează la rândul lor pe alte presupuneri istorice.

Nu e clar dacă elementele istorice ale științelor noastre vor rămâne pentru totdeauna distincte. În mecanica cuantică modernă, la fel ca în mecanica newtoniană, există o separare netă între condițiile care descriu starea inițială a sistemului (fie că sistemul e întreg universul, fie că e o parte a lui) și legile care guvernează evoluția sa ulterioară. Dar e posibil ca în cele din urmă condițiile inițiale să apară ca părți ale legilor naturii. Un exemplu simplu care ilustrează cum ar fi posibil acest lucru e oferit de ceea ce numim cosmologia stării staționare, propusă la sfârșitul anilor '40 de Herman Bondi și Thomas Gold și (într-o versiune ușor diferită) de Fred Hoyle. În această perspectivă, deși toate galaxiile se îndepărtează unele de altele (fapt deseori exprimat prin afirmația întrucâtva greșită că universul se dilată*), noi cantități de materie sunt continuu create pentru a umple golurile intergalactice aflate în expansiune, în exact ritmul necesar pentru ca universul să arate întotdeauna la fel. Nu avem o teorie credibilă privind felul în care ar avea loc această creare permanentă de materie nouă, dar e de presupus că, în cazul în care am dispune de o asemenea teorie, am putea-o folosi pentru a arăta că expansiunea universului tinde spre un ritm de echilibru la care crearea compensează perfect expansiunea, la fel cum prețurile ar trebui să se regleze până când oferta echilibrează cererea. Într-o asemenea teorie a stării staționare nu există condiții inițiale fiindcă nu există început, în schimb putem deduce aspectul universului din condiția ca acesta să nu se schimbe.

* E înșelătoare afirmația că universul se dilată, deoarece sistemele solare și galaxiile nu se dilată, iar spațiul însuși nu se dilată. Galaxiile se îndepărtează la fel cum un nor de particule se destramă odată ce acestea sunt puse în mișcare unele față de altele. (*N.a.*)

Versiunea inițială a cosmologiei stării staționare a fost infirmată de diferite observații astronomice, în primul rând de descoperirea în 1964 a radiației de microunde, care pare să fie o relictă dintr-un timp când universul era mult mai fierbinte și mai dens. E posibil să se revină la ideea stării staționare la o scară mai mare în teorii cosmologice viitoare, în care expansiunea actuală a universului să fie doar o fluctuație a unui univers etern, dar permanent fluctuant, care în medie rămâne mereu același. Există și alte căi mai subtile prin care condițiile inițiale ar putea fi deduse într-o bună zi din legile finale. James Hartle și Stephen Hawking au propus un mod de a ajunge la această contopire a fizicii cu istoria prin aplicarea mecanicii cuantice la nivelul întregului univers. Cosmologia cuantică face în momentul de față obiectul unor controverse aprinse între teoreticieni; problemele conceptuale și matematice sunt foarte dificile și nu părem să ne îndreptăm spre o concluzie clară.

Dar, chiar dacă condițiile inițiale ale universului vor putea fi în cele din urmă încorporate în legile naturii sau deduse din ele, din punct de vedere practic nu vom putea niciodată elimina elementele accidentale și istorice din științe cum sunt biologia, astronomia și geologia. Stephen Gould s-a folosit de straniile fosile din Burgess Shale, Columbia Britanică, pentru a arăta cât de puțin prezent este inevitabilul în tiparul evoluției biologice pe Pământ. Chiar și un sistem foarte simplu poate prezenta fenomenul cunoscut sub numele de *haos*, care zădărnicește eforturile noastre de a prezice viitorul sistemului. Un sistem haotic este unul în care condiții inițiale aproape identice pot duce după un timp la rezultate complet diferite. Posibilitatea existenței haosului în sistemele simple era cunoscută de fapt de la începutul secolului; matematicianul și fizicianul Henri Poincaré a arătat că haosul poate apărea chiar și într-un sistem foarte simplu cum e un sistem solar cu numai două planete. De mult se știe că zonele întunecate din inelele lui Saturn corespund exact acelor regiuni în care orice particulă ce se rotește e azvârlită din pricina mișcării ei haotice. Ce e nou și interesant în studiul haosului nu e descoperirea că el există, ci că anumite tipuri de haos prezintă unele proprietăți cvasiuniversale ce pot fi analizate matematic.

Existența haosului nu presupune că un sistem precum inelele lui Saturn ar avea un comportament care nu e complet determinat de legile mișcării și gravitației și de condițiile lui inițiale, ci doar că în practică nu putem calcula cum vor evolua anumite lucruri (de pildă, orbitele particulelor din zonele întunecate ale inelelor lui Saturn). Mai exact, prezența haosului într-un sistem înseamnă că pentru orice precizie dată cu care specificăm condițiile inițiale va veni în cele din urmă un moment în care nu vom mai putea prezice comportamentul sistemului, dar rămâne adevărat că oricât de departe în viitor am vrea să prezicem comportamentul unui sistem fizic guvernat de legile lui Newton, există un grad de precizie în măsurarea condițiilor inițiale care ne permite să facem această predicție. (E ca și cum ai spune că, deși un automobil care merge continuu va rămâne până la urmă fără benzină oricât de plin ar fi rezervorul, există totuși mereu o cantitate de benzină care să-i permită să ajungă oricât de departe.) Cu alte cuvinte, descoperirea haosului nu a desființat determinismul fizicii precuantice, dar ne-a obligat să fim ceva mai atenți când vorbim despre determinism. Mecanica cuantică nu e deterministă în sensul în care e mecanica newtoniană; principiile de incertitudine ale lui Heisenberg ne avertizează că nu putem măsura poziția și viteza unei particule în același moment și, chiar dacă am face toate măsurătorile care sunt posibile la un moment dat, nu putem prezice decât probabilități pentru rezultatele experimentelor la orice moment ulterior. Dar, după cum vom vedea, chiar și în mecanica cuantică există un sens în care comportamentul oricărui sistem fizic e complet determinat de condițiile sale inițiale și de legile naturii.

Evident, chiar dacă în principiu rămâne valabil un anumit determinism, asta nu ne ajută prea mult când avem de-a face cu sisteme reale care nu sunt simple, cum ar fi bursa sau viața pe Pământ. Intruziunea accidentelor istorice impune limite permanente acelor lucruri pe care putem spera să le explicăm. Orice explicație a formelor actuale de viață de pe Pământ trebuie să țină seama de dispariția dinozaurilor în urmă cu 65 de milioane de ani, care este explicată acum prin impactul cu o cometă, dar nimeni nu va putea explica vreodată de ce s-a întâmplat ca o cometă să lovească Pământul exact în acel moment. Tot ce putem spera este ca știința

să urmărească șirul explicațiilor pentru toate fenomenele naturale până la legile finale și la accidentele istorice.

Intruziunea accidentelor istorice în știință ne obligă și să judecăm atent ce tip de explicații pretindem de la legile noastre finale. De exemplu, când Newton și-a prezentat pentru prima oară legile mișcării și gravitației, a fost ridicată obiecția că aceste legi nu explică una din cele mai importante regularități ale sistemului solar, și anume că toate planetele se rotesc în jurul Soarelui în aceeași direcție. Astăzi înțelegem că motivul e de natură istorică. Modul în care planetele se rotesc în jurul Soarelui e o consecință a modului particular în care sistemul solar s-a condensat dintr-un disc de gaz rotitor. Nu trebuie să ne așteptăm să deducem acest fapt doar din legile mișcării și gravitației. Separarea legilor de istorie e o misiune delicată, pe care învățăm pas cu pas s-o îndeplinim.

Nu numai că e posibil ca ceea ce considerăm acum condiții inițiale arbitrare să putem deduce în cele din urmă din legile universale – dar și reciproca e posibilă: principiile pe care le considerăm *acum* legi universale s-ar putea dovedi în cele din urmă că reprezintă accidente istorice. Recent, câțiva fizicieni teoreticieni s-au jucat cu ideea că norul de galaxii care se extinde în toate direcțiile pe cel puțin zeci de miliarde de ani-lumină și pe care îl numim univers nu e decât un subunivers, o mică parte dintr-un megaunivers mult mai vast alcătuit din multe asemenea părți, iar, în fiecare dintre acestea, constantele naturii (sarcina electrică a electronului, raporturile dintre masele particulelor elementare etc.) iau valori diferite. Poate că până și ceea ce numim acum legi ale naturii se va dovedi că variază de la un subunivers la altul. În acest caz, explicația pentru constantele și legile pe care le-am descoperit poate implica un element istoric ireductibil: accidentul că ne aflăm în subuniversul particular în care locuim. Dar, chiar dacă se va dovedi că aceste idei au oarecare temei, nu cred că va trebui să renunțăm la visul nostru de a descoperi legile finale ale naturii; legile finale vor fi megalegi care determină probabilitățile de a exista în diferite tipuri de subuniversuri. Sidney Coleman și alți fizicieni au făcut deja pași curajoși în direcția calculului acestor probabilități prin aplicarea mecanicii cuantice întregului megaunivers. Ar trebui să subliniez că aceste idei au un caracter pur

speculativ, nu sunt deplin formulate matematic, iar deocamdată nu există date experimentale care să vină în sprijinul lor.

Până acum m-am referit la două dificultăți legate de șirurile explicațiilor care conduc la legile finale: intruziunea accidentelor istorice și complexitatea care ne împiedică să explicăm totul, chiar dacă ne referim numai la universalii, care nu implică elementul istoric. Există și o altă problemă căreia trebuie să-i facem față, cea legată de răsunătorul cuvânt „emergență” [apariție]. Dacă privim natura la niveluri tot mai înalte de complexitate, vedem apărând fenomene care nu-și au echivalent la nivelurile mai simple, și cel mai puțin la nivelul particulelor elementare. De exemplu, nu există ceva asemănător inteligenței la nivelul celulelor vii individuale, și nimic precum viața la nivelul atomilor și moleculelor. Ideea de emergență a fost bine surprinsă de fizicianul Philip Anderson în titlul unui articol din 1972: „Mai mult înseamnă diferit”. Apariția unor noi fenomene la niveluri înalte de complexitate e evidentă mai cu seamă în biologie și în științele comportamentale, dar e important să recunoaștem că emergența nu ține doar de domeniul vieții și al omenescului, ea își are locul ei și în fizică.

Cel mai important exemplu de emergență în fizică sub raport istoric e termodinamica, știința căldurii. Așa cum a fost ea inițial formulată în secolul XIX de Carnot, Clausius și alții, termodinamica era o știință autonomă, nu era dedusă din mecanica particulelor și forțelor, ci se întemeia pe concepte precum entropia și temperatura, care nu au echivalente în mecanică. Doar prima lege a termodinamicii, principiul conservării energiei, oferea o punte de legătură între mecanică și termodinamică. Principiul central al termodinamicii era legea a doua, conform căreia (într-una din formulări) sistemele fizice posedă nu numai o energie și o temperatură, dar și o anumită mărime numită entropie, care, pentru orice sistem închis, crește mereu cu timpul și atinge valoarea maximă când sistemul ajunge la echilibru. Acesta e principiul care interzice Oceanului Pacific să transfere o cantitate de căldură atât de mare Atlanticului în așa fel încât Pacificul să înghețe, iar Atlanticul să fiarbă; un asemenea cataclism nu ar viola legea conservării energiei, dar e imposibil, fiindcă ar reduce entropia.

Fizicienii secolului XIX au privit în general legea a doua a termodinamicii ca pe o axiomă, provenind din experiență, fundamentală ca orice altă lege a naturii. La acel moment, nu părea absurd. Termodinamica funcționa într-o gamă largă de contexte, de la comportamentul aburului (problema care a dat naștere termodinamicii) până la îngheț, fierbere și reacții chimice. (Astăzi am putea adăuga exemple mai exotice; astronomii au descoperit că norii de stele din roiurile globulare aflate în galaxia noastră sau în alte galaxii se comportă la fel ca gazele la o temperatură dată, iar lucrările lui Jacob Bekenstein și Hawking au demonstrat teoretic că o gaură neagră are o entropie proporțională cu aria suprafeței sale.) Dacă termodinamica este universală în asemenea măsură, cum poate fi legată logic de fizica unor anumite tipuri de particule și forțe?

Ulterior, în a doua jumătate a secolului XIX, cercetările unei noi generații de fizicieni teoreticieni (între care Maxwell în Scoția, Ludwig Boltzmann în Germania și Josiah Willard Gibbs în America) au arătat că principiile termodinamicii pot fi de fapt deduse matematic, printr-o analiză a probabilităților pentru diferitele configurații ale anumitor tipuri de sisteme, acele sisteme a căror energie este distribuită unui foarte mare număr de subsisteme, de pildă un gaz a cărui energie e împărțită între moleculele care îl alcătuiesc. (Ernest Nagel a prezentat această situație drept exemplu paradigmatic al reducerii unei teorii la alta.) În această mecanică statistică, energia termică a unui gaz e doar energia cinetică a particulelor sale; entropia e o măsură a dezordinii sistemului; iar legea a doua a termodinamicii exprimă tendința sistemelor izolate de a deveni mai dezordonate. Transferul întregii călduri a oceanelor către Oceanul Atlantic ar reprezenta o creștere a ordinii, motiv pentru care acest lucru nu se întâmplă.

În anii 1880 și 1890, s-a purtat o bătălie între partizanii noii mecanici statistice și cei care, asemenea lui Planck și chimistului Wilhelm Ostwald, continuau să susțină independența logică a termodinamicii. Ernst Zermelo a mers chiar mai departe și a susținut că, deoarece în virtutea mecanicii statistice scăderea entropiei ar fi foarte puțin probabilă, dar nu imposibilă, ipoteza asupra existenței moleculelor pe care se bazează mecanica statistică trebuie să fie greșită. Bătălia a fost câștigată de mecanica statistică, după ce

realitatea atomilor și moleculelor a ajuns să fie general acceptată la începutul acestui secol. Dar, chiar dacă termodinamica a fost explicată în termeni de particule și forțe, ea continuă să opereze cu concepte emergente cum ar fi temperatura și entropia, care își pierd orice semnificație la nivelul particulelor individuale.

Termodinamica e mai curând un mod de a gândi decât un ansamblu de legi fizice universale; oriunde e aplicată, ne permite întotdeauna să justificăm folosirea acelorași principii, dar explicația faptului că termodinamica se aplică unui anume sistem ia forma unei deducții în care detaliile privind componența sistemului sunt supuse metodelor mecanicii statistice, iar aceasta ne conduce inevitabil la nivelul particulelor elementare. Revenind la imaginea săgeților explicative pe care am invocat-o mai sus, termodinamica poate fi privită ca un model de săgeți ce se repetă mereu în contexte fizice foarte diferite, dar oriunde apare acest model explicativ săgețile pot fi urmărite în sens invers prin metodele mecanicii statistice către legi mai profunde, iar în cele din urmă până la principiile fizicii particulelor elementare. După cum se vede din acest exemplu, faptul că o teorie științifică se poate aplica unei mari diversități de fenomene nu înseamnă că teoria e autonomă în raport cu legi fizice mai profunde.

Același principiu se aplică și altor domenii din fizică, cum ar fi problemele înrudite ale haosului și turbulenței. Fizicienii specializați în aceste domenii au descoperit anumite tipare de comportament care se repetă în contexte foarte diferite; de pildă, se crede că există un model universal de distribuție a energiei în vârtejurile de diferite dimensiuni din diverse tipuri de fluide turbulente, de la turbulența mareelor din Puget Sound până la turbulența gazului interstelar produsă de trecerea unei stele. Dar curgerca fluidelor nu e întotdeauna turbulentă, iar, atunci când apare, turbulența nu prezintă întotdeauna aceste proprietăți „universale”. Oricare ar fi formalismul matematic din spatele proprietăților universale ale turbulenței, rămâne totuși de explicat *de ce* acesta ar trebui să se aplice oricărui fluid turbulent, iar la această întrebare răspunsul va face inevitabil apel la accidente (viteza mareelor și forma țărmlui) și la considerații universale (legile mișcării fluidelor

și proprietățile apei), care la rândul lor trebuie explicate prin legi și mai profunde.

Remarci similare se aplică și în biologie. Cea mai mare parte din ce întâlnim aici depinde de accidente istorice, dar există câteva tipare cvasiuniversale, cum ar fi regula biologiei populației, care dictează că masculii și femelele tind să se nască în număr egal. (În 1930 geneticianul Ronald Fisher a arătat că odată ce la o specie apare tendința de a produce, de pildă, mai mulți masculi decât femele, orice genă care îi înzestrează pe indivizi cu tendința de a produce mai multe femele decât masculi se răspândește în întreaga populație, fiindcă progeniturile feminine ale indivizilor care posedă această genă au de înfruntat o competiție mai scăzută pentru găsirea unui partener.) Asemenea reguli se aplică unei mari diversități de specii și ar fi de așteptat ca ea să fie prezentă și la formele de viață de pe alte planete, dacă acestea se reproduc sexual. Raționamentul care conduce la aceste reguli e același, indiferent dacă se aplică oamenilor, păsărilor sau extraterestrilor, dar raționamentul se bazează întotdeauna pe anumite presupuneri privind organismele implicate, iar, dacă ne întrebăm *de ce* ar fi corecte aceste presupuneri, răspunsul trebuie căutat în parte făcând apel la accidente istorice și în parte făcând apel considerații universale, cum ar fi proprietățile ADN-ului (sau orice joacă același rol pe alte planete), care la rândul lor își găsesc explicația în fizică și chimie, deci în modelul standard al particulelor elementare.

Acest aspect e oarecum mascat, fiindcă, în lucrările de termodinamică, dinamica fluidelor sau biologia populațiilor, savanții folosesc limbaje specifice propriilor domenii, vorbind despre entropie, vârtejuri sau strategii de reproducere, iar nu limbajul particulelor elementare. Aceasta se întâmplă nu numai fiindcă în realitate nu putem folosi principiile fundamentale pentru a calcula fenomene complicate; este și o reflectare a tipului de întrebări pe care vrem să le punem în legătură cu aceste fenomene. Chiar dacă am avea un calculator uriaș care ar putea urmări istoria fiecărei particule elementare dintr-un val mareic sau dintr-o musculiță de oțet, acest munte de rezultate obținute de calculator nu i-ar fi de mare ajutor celui care ar vrea să știe dacă apa era turbulentă sau musculița era în viață.

Nu există nici un motiv care să ne îndreptățească să presupunem că, dacă explicațiile științifice converg, trebuie să convergă și metodele științifice. Termodinamica, haosul și biologia populațiilor vor continua fiecare să opereze cu propriul limbaj, cu propriile reguli, indiferent câte lucruri noi descoperim despre particulele elementare. După cum spunea chimistul Roald Hoffman, „cele mai multe dintre conceptele utile ale chimiei [...] sunt imprecise. Când sunt reduse la fizică, tind să dispară“. Într-un răspuns adresat celor care încearcă să reducă chimia la fizică, Hans Primas a enumerat câteva dintre conceptele utile din chimie care riscă să fie pierdute prin această reducere: valența, structura legăturilor, orbitalii localizați, aromaticitatea, aciditatea, culoarea, mirosul și hidrofobia. Nu văd nici un motiv pentru care chimiștii ar trebui să înceteze să vorbească despre asemenea lucruri, atâta vreme cât li se par utile sau interesante. Dar faptul că ei continuă s-o facă nu aruncă nici o îndoială asupra adevărului că toate aceste noțiuni ale chimiei funcționează în acest mod datorită mecanicii cuantice subiacente a electronilor, protonilor și neutronilor. După cum remarca Linus Pauling, „nu există nici o parte a chimiei care să nu depindă, în fundamentele ei teoretice, de principiile mecanicii cuantice“.

Dintre toate domeniile experienței, pe care încercăm să le legăm de principiile fizicii prin săgeți explicative, conștiința prezintă cea mai mare dificultate. Ne cunoaștem propriile gânduri conștiente în mod direct, fără intervenția simțurilor, deci cum ar putea fi adusă conștiința în sfera fizicii și a chimiei? Fizicianul Brian Pippard, titularul catedrei lui Maxwell în calitate de Profesor Cavendish la Universitatea din Cambridge, pune astfel problema: „Este cu certitudine imposibil ca un fizician teoretician, având la dispoziție o putere de calcul nelimitată, să deducă pornind de la legile fizicii că o anumită structură complexă e conștientă de propria ei existență.“

Trebuie să mărturisesc că găsesc acest subiect extrem de dificil și că nu am o pregătire specială în asemenea probleme. Dar cred că nu sunt de acord cu Pippard și cu mulți alții care adoptă aceeași poziție. E limpede că există ceea ce un critic literar ar numi un corelat obiectiv al conștiinței; există modificări fizice și chimice în creierul și corpul meu care observ că sunt corelate (fie cauză, fie efect) cu modificări ale gândurilor mele conștiente. Când sunt

mulțumit obișnuiesc să zâmbesc; creierul meu are o activitate electrică diferită când sunt treaz sau când dorm; hormonii din sângele meu declanșează emoții puternice; uneori gândesc cu voce tare. Toate acestea nu sunt conștiința însăși; nu poți exprima nicio dată în termeni de zâmbete, unde cerebrale, hormoni sau cuvinte ce *simți* atunci când ești fericit sau trist. Dar lăsând conștiința la o parte pentru moment, pare rezonabil să presupunem că aceste corelate obiective ale conștiinței pot fi studiate prin metode științifice și vor fi în cele din urmă explicate în termenii fizicii și chimiei creierului și corpului. (Prin „explicate” nu înțeleg neapărat că vom putea prezice totul, și nici măcar foarte mult, ci că vom înțelege de ce zâmbetele, undele cerebrale și hormonii funcționează astfel, la fel cum, deși nu putem prezice cum va fi vremea luna viitoare, înțelegem totuși meteorologia.)

Chiar la Cambridge-ul lui Pippard există un grup de biologi conduși de Sydney Brenner care au descifrat integral diagrama de conexiuni a sistemului nervos al unui mic vierme nematod, *C. elegans*, astfel încât ei au deja o bază pentru a înțelege într-un anume sens comportamentul viermelui. (Ceea ce lipsește deocamdată este un program care, pornind de la această diagramă de conexiuni, să poată genera comportamentul observat al viermelui.) Desigur, un vierme nu este un om. Dar între vierme și om există un spectru continuu de animale cu sisteme nervoase din ce în ce mai complexe, insecte, pești, șoareci și maimuțe. Unde ar trebui trasă linia de demarcație?

Să presupunem că vom ajunge să înțelegem corelatele obiective ale conștiinței în termenii fizicii (incluzând și chimia) și că vom înțelege de asemenea cum au evoluat acestea până la stadiul actual. Nu e absurd să sperăm că, atunci când corelatele obiective ale conștiinței vor fi explicate, undeva în explicațiile noastre vom putea recunoaște ceva, un sistem fizic de prelucrare a informației, care corespunde felului în care ne percepem conștiința, ceea ce Gilbert Ryle numea „fantoma din mașină”. S-ar putea să nu fie o explicație a conștiinței, dar n-ar fi nici prea departe de așa ceva.

Nu avem nici o garanție că progresul din alte domenii ale științei va primi un sprijin direct din partea vreunei noi descoperiri privind particulele elementare. Dar (repet, și nu pentru ultima oară) nu

mă interesează aici atât de mult ce *fac* oamenii de știință, pentru că asta reflectă inevitabil limitările și interesele umane, cât ordinea logică intrinsecă naturii. În acest sens se poate spune că ramurile fizicii, cum e termodinamica, și alte științe, cum sunt chimia și biologia, se întemeiază pe legi mai profunde, în special pe legile fizicii particulelor elementare.

Vorbind aici despre o ordine logică a naturii, am adoptat tacit perspectiva pe care istoricii filozofiei ar numi-o „realistă” – realistă nu în sensul modern curent de a fi cu capul pe umeri și imun la iluzii, ci într-un sens mult mai vechi: de a crede în realitatea ideilor abstracte. Un realist din Evul Mediu credea în realitatea universalilor, cum ar fi ideile lui Platon, spre deosebire de nominaliști, precum William de Ockham, care susțineau că acestea nu sunt decât nume. (Felul în care am folosit cuvântul „realist” ar fi fost pe placul unuia dintre autorii mei preferați, victorianul George Gissing, care dorea ca „niciodată să nu mai fie folosite cuvintele *realism* și *realist* altfel decât în sensul lor propriu din filozofia scolastică”.) Nu vreau în nici un caz să intru în această dispută de partea lui Platon. Eu pledez aici pentru realitatea legilor naturii, spre deosebire de pozițiviștii moderni care acceptă doar realitatea a ceea ce poate fi observat direct.

Când spunem că un lucru este real, exprimăm pur și simplu un soi de respect. Înțelegem că acel lucru trebuie luat în serios fiindcă ne poate afecta pe căi ce nu se află în întregime sub controlul nostru și fiindcă nu-l putem cunoaște fără a face un efort care ne depășește imaginația. Afirmația e adevărată de pildă pentru scaunul pe care stau (ca să iau un exemplu îndrăgit de filozofi) și nu e neapărat o dovadă că scaunul e real, ci reprezintă doar ceea ce *înțelegem* noi atunci când spunem că scaunul e real. Ca fizician, percep explicațiile și legile științifice drept lucruri care sunt ceea ce sunt și nu pot fi născocite la întâmplare, astfel încât relația mea cu aceste legi nu diferă prea mult de relația cu scaunul meu, și de aceea acord legilor naturii (pentru care legile actuale sunt o aproximație) onoarea de a fi reale. Această impresie e confirmată atunci când se dovedește că o lege a naturii nu este ceea ce ne închipuiam noi, o experiență asemănătoare cu ceea ce se întâmplă atunci când te așezi și descoperi că scaunul nu-i la locul lui. Trebuie totuși să

recunosc că dorința mea de a conferi titlul de „real“ seamănă oarecum cu dorința lui Lloyd George de a conferi titluri de noblete; ea arată cât de puțin îmi pasă de titluri.

Această discuție privind realitatea legilor naturii ar deveni mai puțin academică dacă am intra în contact cu alte ființe inteligente de pe planete îndepărtate, care au găsit la rândul lor explicații științifice pentru fenomenele naturale. Am afla oare că ei au descoperit aceleași legi ale naturii? Indiferent ce legi ar fi descoperit extraterestrii, ele ar fi evident exprimate într-un limbaj și o notatie diferite, dar asta nu ne împiedică să ne întrebăm dacă există vreo corespondență între legile lor și ale noastre. Dacă răspunsul ar fi da, atunci cu greu am putea nega realitatea obiectivă a acestor legi.

Desigur, nu cunoaștem răspunsul, dar aici pe Pământ am fost deja martorii unui test la scară mică pentru o întrebare similară. Ceea ce numim fizica modernă s-a întâmplat să-și aibă originea în Europa la sfârșitul secolului al XVI-lea. Aceia care se îndoiesc de realitatea legilor naturii ar putea presupune că, așa cum alte părți ale lumii și-au păstrat limbi și religii diferite, ar trebui să-și fi păstrat și propriile tradiții științifice, ajungând în cele din urmă la legi ale fizicii complet diferite de cele din Europa. Evident, asta nu s-a întâmplat: fizica Japoniei și Indiei moderne este aceeași cu fizica Europei și a Americii. Recunosc că argumentul nu e întrutotul convingător, din moment întreaga lume a fost profund influențată și de alte aspecte ale civilizației occidentale, de la organizarea militară la blue jeans. Și totuși, când ascult o discuție despre teoria cuantică a câmpului sau despre interacțiile slabe într-o sală de seminar din Tsukuba sau din Bombay am o puternică senzație că legile fizicii au o existență de sine stătătoare.

Descoperirea structurii de conexiuni convergente a explicațiilor științifice are implicații profunde nu doar pentru oamenii de știință. În afara curentului principal al științei există mici bazine izolate reprezentând ceea ce aș numi (folosind un termen neutru) așa-zise științe: astrologia, premoniția, „canalizarea“, clarviziunea, telekinzia, creaționismul și altele de același fel. Dacă s-ar dovedi că există o urmă adevăr în vreuna din aceste noțiuni, ar fi descoperirea secolului, mult mai interesantă și mai importantă decât tot

ce se întâmplă azi în cercetarea curentă din fizică. Ce concluzie ar trebui deci să tragă un cetățean serios atunci când un profesor, o vedetă de cinema sau editura Time-Life pretinde că există dovezi în favoarea uneia dintre așa-zisele științe?

Ei bine, răspunsul convențional ar fi că aceste dovezi trebuie examinate cu mintea deschisă și fără prejudecăți teoretice. Nu cred că e un răspuns folositor, dar această perspectivă pare să fie larg răspândită. Într-un interviu televizat am spus odată că a crede în astrologie înseamnă a întoarce spatele întregii științe moderne. Am primit apoi o scrisoare politicoasă din partea unui fost chimist și metalurgist din New Jersey, care mi-a reproșat că nu studiasem personal dovezile în favoarea astrologiei. La fel, atunci când Philip Anderson s-a exprimat în scris împotriva clarviziunii și telechineziei, a fost criticat de un coleg de la Princeton, Robert Jahn, care făcea experimente privind ceea ce el numea „fenomene anormale legate de conștiință”. Jahn se plângea că „deși biroul său [al lui Anderson] este la doar câteva sute de metri de al meu, nu ne-a vizitat laboratorul, nu a discutat nici o problemă direct cu mine și, după toate aparențele, nici măcar nu a citit atent ceva din literatura noastră de specialitate”.

Ceea ce îi scapă lui Jahn, chimistului din New Jersey, și altora care împărtășesc aceleași opinii este ideea de interconexiune a cunoașterii științifice. Nu înțelegem totul, dar înțelegem destul pentru a ști că în lumea noastră nu e loc pentru telechinezie sau astrologie. Ce semnal fizic emis de creierele noastre ar putea deplasa obiecte îndepărtate, fără să aibă însă nici un efect asupra vreunui instrument științific? Partizanii astrologiei se referă uneori la rolul indubitabil pe care Luna și Soarele îl au în producerea mareelor, dar efectele câmpurilor gravitaționale ale altor planete sunt mult prea mici pentru a avea efecte detectabile asupra oceanelor Pământului, și cu atât mai puțin asupra unui om, care e mult mai mic. (Nu voi mai insista asupra acestui aspect, dar remarci similare se aplică oricărui efort de a explica clarviziunea, premoniția sau alte așa-zise științe în termenii științei obișnuite.) În orice caz, corelațiile prezise de astrologi nu sunt de acel tip care ar putea apărea din vreun foarte subtil efect gravitațional; astrologii nu pretind doar că o anumită configurație a planetelor influențează

viața de pe Pământ, ci că aceste efecte diferă de la om la om, în funcție de data și ora nașterii sale! De fapt, marea majoritate a celor care cred în astrologie nu își imaginează că în spatele ei s-ar afla gravitația sau vreun alt agent fizic, ci privesc astrologia ca pe o știință de sine stătătoare, cu propriile ei legi fundamentale, imposibil de explicat prin fizică sau prin altceva. Unul dintre marile servicii aduse de descoperirea structurii explicațiilor științifice este că ne-a demonstrat că asemenea științe autonome nu există.

Dar nu ar trebui totuși să testăm astrologia, telekinezia și celelalte pentru a fi siguri de inconsistența lor? Oricine poate testa orice dorește, dar vreau să explic de ce n-aș pierde vremea s-o fac eu însumi și de ce nu recomand nimănui s-o facă. În fiecare clipă suntem asaltați de o mare diversitate de idei novatoare care ar putea fi cercetate: nu numai astrologie și altele asemenea, dar și numeroase idei mult mai apropiate de curentul principal al științei, precum și altele care țin nemijlocit de cercetarea științifică modernă. E absurd să spunem că *toate* aceste idei trebuie testate amănunțit; pur și simplu nu avem timp. În fiecare săptămână primesc cam cincizeci de preprinturi ale unor articole din domeniul fizicii particulelor elementare și astrofizicii, împreună cu câteva articole și scrisori legate de toate tipurile de așa-zise științe. Chiar dacă aș renunța la toate celelalte activități din viața mea, mi-ar fi imposibil să acord atenția cuvenită tuturor acestor idei. Și atunci ce-i de făcut? Nu numai oamenii de știință, ci întreaga lume se confruntă cu probleme asemănătoare. Pentru noi toți pur și simplu nu există altă soluție decât să considerăm că unele dintre aceste idei (probabil marea lor majoritate) nu merită să fie cercetate. Iar cel mai mare ajutor pe care îl primim pentru a face selecția este înțelegerea structurii explicațiilor științifice.

Când coloniștii spanioli din Mexic au început să se îndrepte spre nord în secolul al XVI-lea, către ținutul numit Tejas, au fost mânați de zvonuri privind existența unor orașe de aur, cele șapte orașe de la Cibola. La vremea aceea nu era un lucru absurd. Puțini europeni fuseseră în Tejas, iar oricine și-ar fi putut închipui minunății nemaivăzute. Dar să ne imaginăm că în ziua de azi cineva ar anunța că există șapte orașe de aur undeva în Texasul modern.

Ați recomanda cu inima deschisă organizarea unei expediții pentru a scotoci fiecare colțișor din statul texan, între Red River și Rio Grande, în căutarea acestor orașe? Cred mai degrabă că ați considera că știm deja suficient de multe despre Texas, că a fost explorat și colonizat în asemenea măsură, încât pur și simplu nu merită să căutăm misterioase orașe de aur. Într-un mod asemănător, descoperirea structurii convergente a explicațiilor științifice interconectate ne-a adus un mare serviciu arătându-ne că în natură nu e loc pentru astrologie, telekinezie, creaționism sau alte superstiții.

CAPITOLUL III

Două argumente în favoarea reducționismului

*Tu și eu, dragă, știm de ce
Vara-s văzduhuri azurii
Și de ce pasărea pe ram
Cânt-ale sale melodii.*

MEREDITH WILLSON, *Tu și eu*

Dacă pui întrebarea de ce lucrurile sunt așa cum sunt și dacă, atunci când ți se dă o explicație în termenii unui principiu științific, întrebi de ce acel principiu științific e adevărat și dacă, la fel ca un copil prost crescut, continui să întrebi de ce?, de ce?, de ce?, atunci, mai devreme sau mai târziu, vei fi numit reducționist. Fiecare înțelege prin acest cuvânt altceva, dar eu cred că o trăsătură comună a ideii pe care ne-o facem despre reducționism e percepția unei anume ierarhii: unele adevăruri sunt mai puțin profunde decât altele și pot pot fi reduse la ele, așa cum chimia poate fi redusă la fizică. Reducționismul a devenit, în politica științei, Răul prin excelență; Consiliul Științific Canadian a atacat recent Comitetul Coordonator al Serviciilor Agricole Canadiene, acuzându-l că e dominat de reducționiști. (Consiliul Științific a vrut probabil să spună că respectivul Comitet Coordonator pune un accent prea mare pe biologia și chimia plantelor.) În special fizicienii care studiază particulele elementare riscă să fie numiți reducționiști, iar aversiunea față de reducționism a otrăvit adesea relațiile lor cu alți oameni de știință.

Adversarii reducționismului ocupă un spectru ideologic larg. La capătul său cel mai rezonabil se află aceia care protestează împotriva formelor mai naive ale reducționismului. Aceștia le împărtășesc obiecțiile. Eu însumi mă consider reducționist, dar nu

cred că problemele fizicii particulelor elementare sunt singurele interesante și profunde din știință, și nici măcar din fizică. Nu cred că de exemplu chimiștii ar trebui să renunțe la tot restul activității lor și să se ocupe numai de rezolvarea ecuațiilor mecanicii cuantice pentru diferite molecule. Nu cred nici că biologii ar trebui să înceteze să mai privească plantele și animalele în întregul lor și să se gândească numai la celule și ADN. Pentru mine, reducționismul nu e un principiu călăuzitor pentru programele de cercetare, ci o atitudine față de natura însăși. Nu e nici mai mult, nici mai puțin decât înțelegerea faptului că principiile științifice sunt așa cum sunt datorită altor principii științifice mai profunde (și în unele cazuri datorită accidentelor istorice), iar toate aceste principii pot fi reduse la un ansamblu de legi simple interconectate. În acest moment al istoriei științei se pare că modul optim de abordare a acestor legi este prin fizica particulelor elementare, dar acesta e un aspect conjunctural al reducționismului, iar lucrurile se pot schimba.

La celălalt capăt al spectrului se află adversarii reducționismului, care sunt înfricoșați de ceea ce li se pare a fi răceala științei moderne. Indiferent în ce măsură ei și lumea lor se pot reduce la o problemă de particule sau câmpuri și interacțiile lor, se simt striviți de această cunoaștere. Omul din subterana lui Dostoievski își închipuie că un savant îi spune: „Natura nu-ți cere ție părerea; ea nu dă doi bani pe dorințele tale și nu-i pasă dacă legile ei îți sunt sau nu pe plac. Trebuie să iei lucrurile așa cum sunt...“, iar el îi răspunde: „Doamne Dumnezeu, ce-mi pasă mie de legile naturii și de aritmetică dacă, dintr-un motiv sau altul, legile astea nu-mi sunt pe plac...“ La extrema cea mai extravagantă se află holiștii, cei a căror reacție la reducționism ia forma credinței în energii psihice și forțe vitale care nu pot fi descrise în termenii legilor obișnuite ale naturii neînsuflețite. N-aș încerca să răspund acestor critici printr-un discurs patetic despre frumusețea științei moderne. Perspectiva reducționistă asupra lumii *este* rece și impersonală. Ea trebuie acceptată ca atare nu pentru că ne place, ci pentru că așa e lumea.

La mijlocul spectrului antireducționiștilor se află o grupare mai puțin dezinteresată și mult mai importantă. Sunt oamenii de știință

iritați să audă că domeniile lor științifice se bazează pe legile mai profunde ale fizicii particulelor elementare.

De câțiva ani port o dispută despre reducționism cu un bun prieten, biologul evoluționist Ernst Mayr, care între altele ne-a dat cea mai bună definiție operațională a speciilor biologice. Disputa a început atunci când, într-un articol din 1985, Mayr s-a legat de o afirmație dintr-un articol din *Scientific American* (pe altă temă) pe care îl scrisesem în 1974. În articol menționasem că în fizică sperăm să găsim câteva legi generale simple care să explice de ce natura e așa cum e și că deocamdată ne-am apropiat cel mai mult de o perspectivă unitară prin fizica particulelor elementare. În articolul său, Mayr a considerat că acesta e „un oribil exemplu privind modul în care gândesc fizicienii” și m-a catalogat drept „reducționist intransigent”. I-am răspuns într-un articol din *Nature* că nu sunt un reducționist intransigent, ci un reducționist concesiv.

A urmat o corespondență frustrantă, în care Mayr a făcut o clasificare a diferitelor tipuri de reducționism, încadrându-mă și pe mine într-una din categorii. Nu am înțeles clasificarea; toate categoriile lui mi se păreau la fel și nici una nu corespundea opiniilor mele. Mayr, la rândul lui, nu a înțeles (așa mi s-a părut) distincția pe care o făceam între reducționismul ca regulă generală pentru progresul științific, lucru cu care nu sunt de acord, și reducționismul ca expresie a ordinii din natură, ceea ce cred că e perfect adevărat*. Mayr și cu mine suntem în continuare în relații bune, dar am renunțat să ne convertim unul pe altul.

* Din câte înțeleg eu, Mayr distinge trei tipuri de reducționism: *reducționismul constitutiv* (reducționism ontologic sau analiză), care este o metodă de studiu a obiectelor prin cercetarea constituentilor lor elementari; *reducționismul teoretic*, care este o explicație a unei întregi teorii în termenii unei teorii mai cuprinzătoare; și *reducționismul explicativ*, conform căruia „simpla cunoaștere a componentelor sale ultime ar fi suficientă pentru explicarea unui sistem complex”. Principalul motiv pentru care resping această clasificare e că nici una dintre categorii nu prea are a face cu ce spun eu (dar presupun că reducționismul teoretic se apropie cel mai mult). Fiecare din aceste trei categorii este definită prin ceea ce oamenii de știință fac în realitate, au făcut sau ar putea face; eu vorbesc despre natura însăși. De exemplu, deși fizicienii nu pot explica realmente proprietățile moleculelor foarte complicate precum

Cea mai serioasă amenințare la adresa planului național de cercetare a fost opoziția față de reducționism venită chiar din interiorul fizicii. Pretențiile reducționiste ale fizicii particulelor elementare sunt profund îngrijorătoare pentru unii fizicieni din alte domenii, de pildă fizica stării condensate, care se află în competiție pentru fonduri cu fizicienii particulelor elementare. Aceste dispute au ajuns la noi cote alarmante prin propunerea de a cheltui miliarde de dolari pe un accelerator de particule, Superacceleratorul Supraconductor. În 1987, directorul executiv al biroului de relații publice al Societății Americane de Fizică a remarcat că proiectul superacceleratorului „este poate subiectul cel mai controversat cu care s-a confruntat vreodată comunitatea fizicienilor”. În perioada în care am activat în consiliul de supervizare a proiectului superacceleratorului, eu și ceilalți membri ai consiliului am făcut mari eforturi să explicăm publicului ce urmărește proiectul. Unul dintre membrii consiliului a spus că n-ar trebui să dăm impresia că am privi fizica particulelor elementare drept un domeniu cu implicații mai profunde decât alte domenii, fiindcă riscăm să-i irităm pe colegii din alte ramuri ale fizicii.

Motivul pentru care dăm impresia că așezăm fizica particulelor elementare la un nivel mai profund decât alte ramuri ale fizicii e că pur și simplu așa stau lucrurile. Nu știu cum să apăr fondurile alocate fizicii particulelor decât vorbind deschis. Dar, când spun că fizica particulelor elementare se află la un nivel mai profund, nu înțeleg prin asta că ar fi mai profundă din punct de vedere matematic sau mai importantă pentru progresul altor domenii, ci doar că se află mai aproape de punctul de convergență al tuturor săgeților noastre explicative.

Cel dintâi dintre fizicienii mârniți de pretențiile fizicii particulelor este Philip Anderson de la Laboratoarele Bell și de la Princeton, un fizician teoretician care a oferit multe dintre cele

ADN-ul în termenii mecanicii cuantice a electronilor, nucleelor și forțelor electrice, și deși chimia reușește să trateze aceste probleme cu limbajul și conceptele sale proprii, nu există totuși principii autonome ale chimiei care să fie adevăruri independente și să nu se bazeze pe principii mai profunde ale fizicii. (N. a.)

mai pătrunzătoare idei din domeniul fizicii moderne a stării condensate (fizica semiconductoarelor, a supraconductoarelor etc.). Anderson a depus mărturie împotriva proiectului superacceleratorului în aceleași audieri ale comitetului Congresului în care am depus și eu mărturie în 1987. El simțea (la fel ca mine) că în fizica stării condensate cercetarea e insuficient finanțată de Fundația Națională pentru Știință. El simțea (la fel ca mine) că mulți absolvenți sunt seduși de farmecul fizicii particulelor elementare, când ar putea urma cariere mai promițătoare în plan științific în fizica stării condensate și în domeniile înrudite. Dar Anderson a mers până la a afirma că „[rezultatele din fizica particulelor] nu sunt cu nimic mai profunde decât contribuția lui Alan Turing la întemeierea informaticii sau cea a lui Francis Crick și James Watson la descoperirea secretului vieții“.

Cu nimic mai profunde? Acesta e punctul esențial în care mă despart de Anderson. Voi trece peste opera lui Turing și începuturile informaticii, care mi se pare că țin mai curând de matematică sau de tehnologie decât de științele naturii. Matematica în sine nu explică – ea este doar mijlocul prin care folosim un set de fapte pentru a explica un altul și limbajul în care exprimăm explicațiile noastre. Dar prezentarea descoperirii făcute de Crick și Watson privind structura de spirală dublă a moleculei de ADN (care furnizează mecanismul prin care informația genetică e conservată și transmisă) drept secretul vieții îmi oferă muniție pentru argumentul *meu*. Această prezentare a descoperirii ADN-ului i-ar șoca pe unii biologi la fel cum par să-l șocheze pe Anderson pretențiile fizicii particulelor. De exemplu, Harry Rubin a scris în urmă cu câțiva ani că „revoluția ADN a făcut ca o generație de biologi să creadă că secretul vieții zace în întregime în structura și funcționarea ADN-ului. Această credință e neîntemeiată, iar programului reducționist trebuie să i se adauge un nou cadru conceptual“. Prietenul meu Ernst Mayr a luptat ani de-a rândul împotriva tendinței reducționiste în biologie și se teme că scopul ei e să reducă tot ce știm despre viață la studiul ADN-ului, susținând că „desigur, natura chimică a unui număr de aspecte necunoscute din teoria clasică a geneticii a fost lămurită prin descoperirea ADN-ului,

ARN-ului etc., dar asta nu a afectat în nici un fel natura geneticii transmisiei“.

Nu voi intra în această dispută a biologilor, și în nici un caz de partea antireducționiștilor. Fără îndoială că ADN-ul a fost extrem de important în multe sfere ale biologiei. Există însă *unii* biologi ale căror cercetări nu au fost direct afectate de descoperirile biologiei moleculare. Cunoașterea structurii ADN este de puțin folos unui ecologist al populațiilor care încearcă să explice diversitatea speciilor de plante din zonele tropicale sau unui specialist în biomecanică ce încearcă să înțeleagă zborul fluturilor. După părerea mea, chiar dacă nici unui biolog nu i-ar fi de folos descoperirile biologiei moleculare în studiile pe care le întreprinde, există totuși un sens important în care Anderson are dreptate când vorbește despre secretul vieții. Nu am în vedere faptul că *descoperirea* ADN-ului a fost fundamentală pentru toate *științele* vieții, ci mai degrabă că ADN-ul este fundamental pentru viața însăși. Lucrurile vii sunt așa cum sunt pentru că au evoluat în acest mod prin selecție naturală, iar evoluția e posibilă deoarece proprietățile ADN-ului și ale moleculelor înrudite au permis organismelor să-și transmită amprenta genetică progeniturilor. În exact același sens, fie că *descoperirile* fizicii particulelor elementare sunt utile tuturor celorlalți oameni de știință, fie că nu, *principiile* fizicii particulelor elementare sunt fundamentale pentru întreaga natură.

Adversarii reducționismului se bazează adesea pe argumentul că descoperirile din fizica particulelor elementare nu par să fie utile oamenilor de știință din alte domenii. Afirmția nu e susținută de dovezi istorice. În prima jumătate a acestui secol fizica particulelor elementare era aproape în întregime fizica electronilor și fotonilor, care a avut un efect imens și incontestabil asupra modului nostru de a înțelege materia în toate formele ei. Descoperirile fizicii particulelor elementare de azi au deja o importantă influență asupra cosmologiei și astronomiei – de exemplu, folosim cunoștințele despre diferitele tipuri de particule elementare pentru a calcula producția elementelor chimice în primele câteva minute ale universului. Nimeni nu poate bănuî ce alte consecințe ar putea avea aceste descoperiri.

Dar, de dragul discuției, să presupunem pentru moment că *nici* o descoperire făcută de fizicienii particulelor elementare nu va mai afecta vreodată activitatea oamenilor de știință din alte domenii. Cercetările din fizica particulelor elementare vor avea în continuare o importanță deosebită. Știm că evoluția ființelor vii a fost posibilă datorită proprietăților ADN-ului și a altor molecule și că proprietățile oricărei molecule sunt determinate de proprietățile electronilor, nucleelor atomice și forțelor electrice. Dar de ce toate acestea sunt așa cum sunt? Răspunsul a fost dat în parte de modelul standard al particulelor elementare, iar acum vrem să facem următorul pas și să explicăm modelul standard, precum și principiile relativității și alte simetrii pe care acesta se bazează. Nu înțeleg de ce aceasta n-ar fi o sarcină importantă pentru oricine e curios să știe de ce lumea e așa cum e, lăsând la o parte orice posibilă utilizare a fizicii particulelor elementare în alte științe.

Într-adevăr, particulele elementare nu sunt prea interesante în sine, în orice caz nu în felul în care sunt interesați oamenii. În afara impulsului și spinului* său, fiecare electron din univers este exact la fel cu oricare alt electron – dacă ai văzut un electron, i-ai văzut pe toți. Dar tocmai această simplitate sugerează că electronii, spre deosebire de oameni, nu sunt alcătuiți dintr-un număr de constituenți mai simpli, ci sunt ei înșiși ceva apropiat de constituenții fundamentali ai tuturor celorlalte lucruri. Particulele elementare sunt interesante tocmai pentru că sunt atât de plictisitoare; simplitatea lor sugerează că studiul particulelor elementare ne va aduce mai aproape de o înțelegere cuprinzătoare a naturii.

Exemplul supraconductibilității la temperaturi înalte ne-ar putea ajuta să explicăm sensul limitat și specific în care fizica particulelor elementare este mai profundă decât alte ramuri ale fizicii. Chiar acum, Anderson și alți fizicieni ai stării condensate încearcă să înțeleagă surprinzătoarea persistență a supraconductibilității în

* Spinul este o mărime fizică tipic cuantică și ar reprezenta, conform unei analogii intuitive (dar neriguroase) cu fizica clasică, rotația particulei în jurul axei proprii. Numele provine de la englezescul *to spin* = a se învârti. (*N. red.*)

anumiți compuși ai cuprului, oxigenului și altor elemente mai exotice la temperaturi mult mai înalte decât cele la care se credea că acest lucru e cu putință. În același timp, fizicienii particulelor elementare încearcă să înțeleagă originea maselor cuarcilor, electronilor și altor particule din modelul standard. (Întâmplător, cele două probleme sunt înrudite din punct de vedere matematic; după cum vom vedea, amândouă se reduc la întrebarea cum pot anumite simetrii ale ecuațiilor să dispară în soluțiile lor.) Fără îndoială, fizicienii stării condensate vor rezolva în cele din urmă problema supraconductibilității la temperaturi înalte fără nici un ajutor direct din partea fizicienilor particulelor elementare, iar când fizicienii particulelor elementare vor înțelege problema maselor, o vor face foarte probabil fără implicarea directă a fizicii stării condensate. Diferența dintre aceste două probleme este că, atunci când fizicienii stării condensate vor explica în cele din urmă supraconductibilitatea la temperaturi înalte – indiferent ce noi idei strălucite vor trebui găsite pentru asta – în cele din urmă explicația va lua forma unei demonstrații matematice care deduce existența acestui fenomen din proprietăți *cunoscute* ale electronilor, fotonilor și nucleelor atomice; dimpotrivă, când fizicienii particulelor vor înțelege până la urmă originea masei din modelul standard, explicația se va baza pe aspecte ale modelului standard asupra cărora suntem destul de nesiguri în momentul de față și pe care nu le putem descifra (deși le putem ghici) fără noi date provenind de la instalații cum e superacceleratorul. Fizica particulelor elementare reprezintă deci o frontieră a cunoștințelor noastre într-un mod în care fizica stării condensate nu este.

Aceasta nu rezolvă problema alocării fondurilor pentru cercetare. Există multe motive pentru a face cercetare științifică – aplicații în medicină și tehnologie, prestigiu național, virtuozitate matematică, simpla bucurie de a înțelege fenomene frumoase – care sunt satisfăcute la fel de bine (uneori mai bine) de alte științe decât fizica particulelor. Fizicienii particulelor nu cred că aspectul fundamental și unic al muncii lor le dă dreptul la partea leului din fondurile

publice, dar ei cred că acesta nu este un factor care poate fi pur și simplu ignorat în deciziile asupra susținerii activității științifice.

Cea mai cunoscută încercare de a stabili standarde pentru acest tip de decizii este probabil cea a lui Alvin Weinberg*. Într-un articol din 1964 el a oferit următoarea soluție: „Aș lămuri problema meritului științific propunând ca, în cazul egalității conform altor criterii, *cel mai mare merit științific să îl aibă acel domeniu care contribuie cel mai mult și luminează cel mai puternic disciplinele științifice învecinate*“ (sublinierea îi aparține). După ce a citit un articol de-al meu pe această temă, Alvin mi-a scris pentru a-mi reaminti propunerea sa. Eu nu o uitasem, dar nici nu eram de acord cu ea. După cum i-am scris în replică lui Alvin, acest gen de raționament putea fi folosit spre a justifica cheltuirea a miliarde de dolari pentru clasificarea fluturilor din Texas, pe motiv că aceasta ar aduce lumină în clasificarea fluturilor din Oklahoma și a fluturilor în general. Am dat acest exemplu stupid doar ca să ilustrez că nu e prea relevant pentru importanța unui proiect științific neinteresant să spui că e important pentru alte proiecte științifice neinteresante. (Probabil acum am probleme cu entomologii care ar dori să cheltuiască miliarde de dolari pentru a clasifica fluturii din Texas.) Ce mă nemulțumește cu adevărat la criteriile de selecție științifică ale lui Alvin Weinberg e absența perspectivei *reducționiste*; ceea ce face ca o cercetare științifică să fie interesantă este că ne apropie de punctul în care converg toate explicațiile noastre.

* Alvin Weinberg și cu mine suntem prieteni, dar nu rude. În 1966, când am fost pentru prima oară la Harvard, m-am întâlnit la clubul facultății cu regretatul John Van Vleck, un fizician mai în vârstă, aristocratic și sever, unul dintre primii care au aplicat noile metode ale mecanicii cuantice la teoria stării solide la sfârșitul anilor '20. Van Vleck m-a întrebat dacă sunt rudă cu „acel“ Weinberg. Am fost puțin derutat, dar am înțeles ce-a vrut să spună; pe vremea aceea eu eram un teoretician mai degrabă începător, iar Alvin era directorul Laboratorului Național Oak Ridge. Mi-am luat inima în dinți și i-am răspuns că „Weinberg“ eram eu. Nu cred că am reușit să-l impresionez pe Van Vleck. (N. a.)

Câteva din temele disputei asupra reducționismului din fizică au fost prezentate de James Gleick. (Gleick e cel care a făcut accesibilă fizica haosului publicului larg.) Într-o conferință recentă, el susținea:

Haosul e antireducționist. Această nouă știință face o afirmație tranșantă despre lume: când apar cele mai interesante probleme, cele legate de ordine și dezordine, descompunere și creativitate, formarea structurilor și viața însăși, întregul nu poate fi explicat făcând apel la părțile componente.

Există legi fundamentale despre sistemele complexe, dar ele sunt legi de un tip nou. Sunt legi ale structurii, organizării și scării dimensionale care pur și simplu se pierd când ne concentrăm asupra constituenților individuali ai unui sistem complex – la fel cum psihologia unei gloate care a comis un linșaj dispare când interoghezi participanții individuali.

Aș răspunde în primul rând spunând că probleme diferite sunt interesante în moduri diferite. Evident că problemele privind creativitatea și viața sunt interesante pentru că noi suntem vii și am dori să fim creativi. Dar există și alte probleme care sunt interesante pentru că ne aduc mai aproape de punctul de convergență al explicațiilor noastre. Descoperirea izvoarelor Nilului nu a lămurit problemele agriculturii egiptene, dar cine poate spune că nu a fost interesantă?

De asemenea, e superfluu să vorbești despre explicarea întregului „făcând apel la părțile componente”; studiul cuarcilor și electronilor e fundamental nu pentru că întreaga materie obișnuită e alcătuită din quarci și electroni, ci fiindcă studiind cuarcii și electronii credem că vom afla ceva despre *principiile* care guvernează totul. (Un experiment în care cuarcii din nucleeele atomice au fost bombardați cu electroni a validat teoria unificată a două dintre cele patru forțe fundamentale din natură, forța slabă și cea electromagnetică.) De fapt, fizicienii particulelor elementare din ziua de azi acordă mai multă atenție particulelor exotice care *nu* sunt prezente în materia obișnuită decât cuarcilor și electronilor care sunt prezenți, deoarece credem că în momentul de față întrebările la care trebuie găsite răspunsuri vor fi lămurite mai bine studiind

aceste particule exotice. Când Einstein a explicat natura gravitației în teoria generală a relativității nu a făcut apel la „părți“, ci la geometria spațiului și timpului. S-ar putea ca fizicienii secolului XXI să considere că studiul găurilor negre sau al radiației gravitaționale dezvăluie mai multe despre legile naturii decât fizica particulelor elementare. Concentrarea noastră actuală asupra fizicii particulelor elementare se bazează pe un raționament tactic – în *acest* moment din istoria științei asta e calea de a înainta spre teoria ultimă.

În fine, se pune problema emergenței: e oare adevărat că există noi tipuri de legi care guvernează sistemele complexe? Da, desigur, în sensul că niveluri diferite ale experienței necesită o descriere și o analiză în termeni diferiți. Același lucru e la fel de valabil pentru chimie, ca și pentru haos. Dar e oare vorba de tipuri de legi *fundamental* noi? Banda celor care comit un linșaj despre care vorbea Gleick oferă un contraexemplu. Putem formula ceea ce aflăm despre gloate sub forma unor legi (așa cum bătrânii au văzut că întotdeauna revoluțiile își mănâncă propriii fii), dar, dacă vrem să știm de ce sunt valabile asemenea legi, nu am fi mulțumiți să ni se spună că legile sunt fundamentale, fără a primi o explicație în alți termeni. Am căuta mai curând o explicație reduționistă în termenii psihologiei individuale. Același lucru e valabil și pentru apariția haosului. Progresul spectaculos obținut în ultimii ani în acest domeniu nu a însemnat doar observarea sistemelor haotice și formularea legilor empirice care le descriu; încă și mai importantă a fost deducerea matematică a legilor care guvernează haosul din legile fizicii microscopice care guvernează sistemele ce devin haotice.

Bănuiesc că toți oamenii de știință (și probabil majoritatea oamenilor, în general) sunt în practică la fel de reduționiști ca mine, deși unora precum Ernst Mayr și Philip Anderson nu le place să se numească astfel. Cercetarea medicală, de pildă, e confruntată cu probleme atât de urgente și de dificile încât propunerea unor noi tratamente se bazează adesea pe statistica medicală, fără înțelegerea mecanismului acestora, dar, chiar dacă un nou tratament e sugerat de experiența asupra unui mare număr de pacienți, acesta va fi probabil privit cu scepticism dacă nu se întrezărește măcar

cum ar putea fi explicat pe cale reducționistă în termenii unor științe ca biochimia și biologia celulară. Să presupunem că o revistă medicală a prezentat două articole despre două tratamente diferite pentru scrofuloză: unul prin ingerarea supei de pui, iar celălalt prin atingerea unui rege. Chiar dacă dovezile statistice prezentate pentru aceste două tratamente au ponderi egale, cred că medicii (și toți ceilalți oameni) vor avea reacții foarte diferite la cele două articole. În privința supei de pui cred că majoritatea oamenilor vor fi destul de receptivi, păstrând rezerve până când acest tratament va putea fi confirmat de teste independente. Supa de pui e un amestec complicat de lucruri bune, și cine știe ce efect ar putea avea conținutul său asupra micobacteriei care provoacă scrofuloza? Pe de altă parte, oricâte dovezi statistice ne-ar fi oferite pentru a se demonstra că atingerea unui rege ajută la vindecarea scrofulozei, cititorii vor rămâne sceptici, bănuind că la mijloc e o escrocherie sau o coincidență întâmplătoare, fiindcă nu-și pot închipui cum ar putea fi explicat un asemenea tratament pe cale reducționistă. Cum ar putea conta pentru o microbacterie dacă persoana care le atinge „gazda“ a fost încoronată și miruită cum se cuvine sau dacă e fiul cel mare al monarhului precedent. (Chiar și în Evul Mediu, când se credea că atingerea unui rege vindecă scrofuloza, regii înșiși se pare că se îndoiau de aceasta. Din câte știu, în toate disputele medievale asupra unor succesiuni controversate, cum au fost cele între Plantagenet și Valois sau între York și Lancaster, nici un pretendent la tron nu a încercat vreodată să se impună demonstrând puterea curativă a atingerii sale.) Un biolog din ziua de azi care ar protesta afirmând că acest tratament nu are nevoie de nici o explicație fiindcă puterea atingerii unui rege este o lege autonomă a naturii, fundamentală ca oricare alta, nu ar primi prea multe încurajări din partea colegilor săi, deoarece aceștia sunt călăuziți de o perspectivă reducționistă asupra lumii, în care nu e loc pentru asemenea legi autonome.

Același lucru e valabil în toate științele. Nu am acorda prea multă atenție propunerii unei legi autonome în macroeconomie, care nu ar putea fi explicată în termenii comportamentului

individual, sau unei ipoteze asupra supraconductibilității, imposibil de explicat prin proprietățile electronilor, fotonilor și nucleelor. Atitudinea reduționistă oferă un filtru util, care îi scutește pe oamenii de știință din toate domeniile să piardă vremea cu idei ce nu merită să fie urmate. În acest sens, suntem acum cu toții reduționiști.

CAPITOLUL IV

Mecanica cuantică și dificultățile ei

Un jucător puse bila pe masă și o lovi cu tacul. Privind bila care se rostogolea, domnul Tompkins observă cu surprindere că bila începea să se „destrame”. Aceasta era singura expresie pe care o putu găsi pentru strania comportare a bilei care, în mișcarea ei pe suprafața verde, părea să devină din ce în ce mai difuză, pierzându-și contururile nete. Părea că nu mai e o singură bilă rostogolindu-se pe masă, ci o mulțime de bile contopindu-se unele cu altele. Domnul Tompkins observase deseori asemenea fenomene, dar de data asta nu băuse nici o picătură de whisky și nu putea pricepe ce se întâmpla.

GEORGE GAMOW, *Domnul Tompkins în Țara Minunilor*

Descoperirea mecanicii cuantice la mijlocul anilor '20 a fost cea mai profundă revoluție din fizica teoretică de la nașterea fizicii moderne în secolul al XVII-lea. În discuția anterioară despre proprietățile unei bucăți de cretă, șirurile noastre de întrebări ne-au condus de fiecare dată la răspunsuri în termenii mecanicii cuantice. Toate teoriile matematice la modă pe care fizicienii le-au urmat în ultimii ani – teoriile cuantice de câmp, teoriile de etalonare, teoriile supercorzilor – sunt formulate în cadrul mecanicii cuantice. Dacă există ceva din înțelegerea noastră actuală asupra naturii care ar putea supraviețui într-o teorie finală, aceasta e mecanica cuantică.

Importanța istorică a mecanicii cuantice nu rezidă atât în faptul că a furnizat răspunsuri la multe întrebări vechi privind natura materiei – mult mai important e că ea a schimbat ideile noastre despre întrebările pe care ne e permis să le punem. Pentru fizicienii care i-au urmat lui Newton teoriile fizice erau menite să furnizeze un aparat matematic care le-ar fi permis să calculeze pozițiile și vitezele particulelor oricărui sistem la orice moment ulterior prin

cunoașterea completă (evident, imposibil de atins în practică) a valorilor acestora la orice moment dat. Dar mecanica cuantică a introdus un mod complet nou de a vorbi despre starea unui sistem. În mecanica cuantică vorbim despre construcții matematice numite funcții de undă, care ne dau informații numai despre probabilitățile diferitelor poziții și viteze posibile. Această schimbare e atât de profundă încât fizicienii folosesc acum cuvântul „clasic“ nu pentru a se referi la „greco-romani“ sau „Mozart și ceilalți“, ci la perioada „dinainte de mecanica cuantică“.

Dacă ar fi să alegem un moment care să marcheze nașterea mecanicii cuantice, acesta ar fi vacanța luată de tânărul Werner Heisenberg în 1925. Suferind de rinită alergică, Heisenberg a părăsit câmpurile înflorite din apropierea Göttingenului pentru izolată insulă Helgoland din Marea Nordului. Heisenberg și colegii săi se luptaseră ani de zile cu o problemă apărută în 1913, odată cu teoria atomului propusă de Niels Bohr: de ce ocupă electronii în atomi numai anumite orbite permise, cu anumite energii bine definite? Pe Helgoland, Heisenberg a luat totul de la capăt. Din moment ce nimeni nu va putea observa vreodată direct orbita electronului în atom, el s-a hotărât să opereze numai cu mărimi ce pot fi măsurate, și anume cu energiile *stărilor* cuantice în care toți electronii atomului ocupă doar orbite permise și cu ratele la care un atom ar putea efectua o tranziție spontană dintr-o stare cuantică în alta prin emisia unei particule de lumină (foton). Heisenberg a alcătuit un „tabel“ cu aceste rate și a introdus operații matematice cu acest tabel care să conducă la noi tabele, câte un tip de tabel pentru fiecare mărime fizică, precum poziția, viteza sau pătratul vitezei unui electron*. Cunoscând modul în care energia

* Mai exact, datele din tabelul lui Heisenberg erau ceea ce numim amplitudini de tranziție, cantități ale căror pătrate dau ratele de tranziție. Lui Heisenberg i s-a spus după întoarcerea din Helgoland la Göttingen că operațiile sale matematice cu aceste tabele erau deja bine cunoscute matematicienilor; asemenea tabele erau numite de matematicieni matrici, iar operația prin care un tabel reprezentând viteza unui electron e transformat în cel reprezentând pătratul ei era înmulțirea matricilor. Acesta e un exemplu al capacității miraculoase a matematicienilor de a anticipa structuri relevante pentru lumea reală. (N.a.)

unei particule dintr-un sistem simplu depinde de viteza și poziția sa, Heisenberg a reușit să calculeze un tabel al energiilor sistemului în diversele sale stări cuantice, oarecum o imitație a felului în care e calculată energia unei planete în fizica newtoniană pornind de la poziția și viteza sa.

Dacă cititorul nu înțelege ce a făcut Heisenberg, nu este singurul în această situație. Și eu am încercat de mai multe ori să citesc articolul scris de Heisenberg la întoarcerea sa din Helgoland și, deși cred că înțeleg mecanica cuantică, n-am priceput niciodată motivațiile lui Heisenberg pentru pașii matematici din articolul său. În lucrările lor cele mai importante, fizicienii teoreticieni sunt fie *înțelepți*, fie *magicieni*. Fizicianul-înțelept judecă sistematic problemele fizice pe baza ideilor fundamentale privind felul în care natura ar trebui să fie. Einstein, de pildă, în elaborarea teoriei generale a relativității a jucat rolul unui înțelept; el avea o problemă bine definită – cum să pună de acord teoria gravitației cu noua viziune asupra spațiului și timpului din teoria specială a relativității pe care o propusese în 1905. El a avut câteva indicii prețioase, în special remarcabilul fapt descoperit de Galilei că mișcarea corpurilor mici într-un câmp gravitațional e independentă de natura corpurilor. Aceasta i-a sugerat lui Einstein că gravitația ar putea fi o proprietate a spațiului-timp. Einstein a avut de asemenea la dispoziție o teorie matematică bine încheagată a spațiilor curbe, elaborată de Riemann și alți matematicieni în secolul XIX. Astăzi, teoria generală a relativității poate fi predată urmărind cam aceleași raționamente pe care le-a folosit Einstein când și-a scris articolul din 1915. Există apoi fizicienii-magicieni, care par să nu raționeze deloc, sărind peste toți pașii intermediari spre o nouă viziune asupra naturii. Autorii manualelor de fizică sunt de obicei obligați să refacă munca magicienilor astfel încât ei să pară înțelepți, altminteri nici un cititor nu ar înțelege fizica. Planck a fost un magician atunci când a inventat în 1900 teoria radiației termice, iar Einstein a jucat de asemenea rolul unui magician când a propus ideea de foton în 1905. (Probabil de aceea a considerat mai târziu teoria fonică drept cel mai revoluționar lucru pe care l-a făcut vreodată.) De obicei nu e greu să înțelegi articolele fizicienilor-înțelepți, dar articolele fizicienilor-magicieni sunt

adeseori incomprehensibile. În acest sens articolul lui Heisenberg din 1925 era magie pură.

Poate că nu ar trebui să insistăm atât de mult asupra primului articol al lui Heisenberg. Heisenberg era în legătură cu mai mulți fizicieni teoreticieni înzestrați, printre care Max Born și Pascual Jordan în Germania și Paul Dirac în Anglia, iar înainte de finele anului 1925 aceștia șlefuiseră ideile lui Heisenberg într-o versiune comprehensibilă și sistematică a mecanicii cuantice, numită astăzi mecanica matricială. În luna ianuarie a anului următor, la Hamburg, Wolfgang Pauli, fost coleg de facultate cu Heisenberg, a folosit noua mecanică matricială pentru a rezolva problema crucială a fizicii atomice, calculul energiilor stărilor cuantice ale atomului de hidrogen, justificând astfel precedentele rezultate ad-hoc ale lui Bohr.

Calculul pe baze cuantice al nivelelor energetice ale hidrogenului efectuat de Pauli a fost o demonstrație de virtuozitate matematică, de folosire înțeleaptă a regulilor lui Heisenberg și a simetriilor particulare ale atomului de hidrogen. Deși Heisenberg și Dirac au fost probabil mai creativi decât Pauli, nici un fizician al momentului nu era mai inteligent. Dar nici măcar Pauli nu a fost în stare să-și extindă calculele la următorul atom ca simplitate, cel de heliu, și cu atât mai puțin la atomi mai grei sau la molecule.

Mecanica cuantică predată în cursurile introductive din facultăți și folosită azi în mod curent de chimiști și fizicieni nu e de fapt mecanica matricială a lui Heisenberg, Pauli și a colaboratorilor lor, ci un formalism matematic echivalent – mult mai comod însă – introdus ceva mai târziu de Erwin Schrödinger. În versiunea mecanicii cuantice elaborată de Schrödinger, fiecare stare fizică posibilă a unui sistem e descrisă printr-o cantitate numită *funcția de undă* a sistemului, oarecum asemănător modului în care lumina e descrisă ca o undă a câmpurilor electric și magnetic. Abordarea mecanicii cuantice prin funcții de undă apăruse înainte de lucrarea lui Heisenberg, în articolele din 1923 ale lui Louis de Broglie și în teza sa de doctorat din 1924 de la Paris. De Broglie a intuit că electronul poate fi privit ca un fel de undă având o lungime de undă legată de impulsul său la fel cum lungimile de undă ale luminii sunt legate de impulsul fotonilor conform teoriei lui Einstein: în ambele cazuri lungimea de undă este egală cu o

constantă fundamentală a naturii, numită constanta lui Planck, împărțită la impuls. De Broglie nu bănuia semnificația fizică a unde și nu a inventat nici o ecuație dinamică de undă; pur și simplu el a presupus că orbitele permise ale electronilor într-un atom de hidrogen trebuie să aibă exact mărimea necesară pentru ca un număr întreg de lungimi de undă să încapă pe circumferința orbitei: o lungime de undă pentru starea cu energia cea mai joasă, două lungimi de undă pentru următoarea și așa mai departe. În mod remarcabil, această potrivire simplă și nu prea bine motivată a avut un succes la fel de mare în explicarea energiei orbitelor electronului în atomul de hidrogen ca și calculele efectuate de Bohr cu un deceniu în urmă.

După o asemenea teză de doctorat, ar fi fost de așteptat ca de Broglie să meargă mai departe și să rezolve toate problemele fizicii. El însă nu a mai făcut aproape nimic important pentru știință în întreaga sa viață. Schrödinger a fost cel care, la Zürich, în 1925–1926 a transformat ideile mai curând vagi ale lui de Broglie privind undele electronului într-un formalism matematic precis și coerent aplicabil electronilor sau altor particule din orice fel de atom sau moleculă. Schrödinger a demonstrat de asemenea că „mecanica sa ondulatorie” e echivalentă cu mecanica matricială a lui Heisenberg; fiecare putând fi dedusă matematic din cealaltă.

În centrul abordării lui Schrödinger se afla o ecuație dinamică (cunoscută de atunci ca ecuația Schrödinger) care dicta modul în care unda oricărei particule date se modifică în timp. Unele soluții ale ecuației Schrödinger pentru electronii din atom oscilează simplu cu o frecvență pură, la fel ca unda sonoră produsă de un diapazon perfect. Asemenea soluții speciale corespund stărilor cuantice stabile posibile ale atomilor și moleculelor (asemănător cu undele staționare de vibrație dintr-un diapazon), energia stării atomice fiind dată de frecvența unde înmulțită cu constanta lui Planck. Acestea sunt energiile ce ne sunt dezvăluite prin culorile luminii pe care atomul o poate emite sau absorbi.

Ecuația Schrödinger este din punct de vedere matematic același tip de ecuație (ecuație diferențială cu derivate parțiale) care a fost folosită în secolul XIX pentru a studia undele sonore sau luminoase. Fizicienii din anii '20 erau deja atât de familiarizați cu acest tip de ecuație de undă încât ei au putut imediat calcula energiile și

alte proprietăți pentru tot felul de atomi și molecule. A fost o epocă de aur pentru fizică. Curând au urmat alte succese, iar misterele care înconjurau atomii și moleculele păreau să dispară unul după altul.

În ciuda acestui succes, nici de Broglie, nici Schrödinger și nici vreun alt fizician nu au știut la început ce fel de cantitate fizică oscila într-o undă a electronului. Orice undă e descrisă în fiecare moment printr-o listă de numere, câte un număr pentru fiecare punct din spațiu prin care trece unda. De exemplu, într-o undă sonoră, numerele dau presiunea aerului în fiecare punct din aer. Într-o undă luminoasă, numerele dau intensitățile și direcțiile câmpurilor electric și magnetic în fiecare punct din spațiu prin care călătorește lumina. Unda electronului putea fi și ea descrisă în orice moment printr-o listă de numere, câte un număr pentru fiecare punct din spațiu în interiorul și în jurul atomului. Această listă poartă numele de funcție de undă, iar numerele individuale sunt valorile funcției de undă. Dar la început nu se putea spune despre funcția de undă decât că era o soluție a ecuației Schrödinger; nimeni nu știa ce mărime fizică e descrisă de aceste numere.

Teoreticienii mecanicii cuantice de la jumătatea anilor '20 se aflau în aceeași situație ca fizicienii care studiaseră lumina la începutul secolului XIX. Observarea unor fenomene ca difracția (abaterea razelor de lumină de la propagarea în linie dreaptă când trec foarte aproape de obiecte sau prin orificii foarte înguste) le sugeraseră lui Thomas Young și Augustin Fresnel că lumina era un fel de undă care nu călătorea în linie dreaptă atunci când era obligată să se strecoare prin orificii mici, fiindcă acestea erau mai mici decât lungimea ei de undă. Dar la începutul secolului XIX nimeni nu știa unda *cui* era lumina; abia odată cu cercetările lui James Clerk Maxwell din anii 1860 a devenit limpede că lumina era unda câmpurilor electrice și magnetice variabile. Dar ce anume variază într-o undă a electronului?

Răspunsul a venit dintr-un studiu teoretic al comportamentului electronilor liberi atunci când sunt împrăștiți pe atomi. E natural să descrii un electron călătorind prin spațiul gol ca un pachet de unde, un mic mănunchi de unde ale electronului care se deplasează împreună, la fel ca pulsul de unde luminoase produs de o lanternă care e aprinsă doar pentru o clipă. Ecuația Schrödinger arată că, atunci când un asemenea pachet de unde lovește un atom,

el se destramă; unele se împrăștiie în toate direcțiile, la fel ca stropii de apă atunci când jetul unui furtun lovește o piatră. Era un lucru straniu; electronii care lovesc atomii zboară într-o direcție sau alta fără să se rupă – ei rămân electroni. În 1926, la München, Max Born a propus interpretarea acestui comportament special al funcției de undă în termeni de probabilități. Electronul nu se rupe, dar poate fi împrăștiat în orice direcție, iar probabilitatea ca electronul să fie împrăștiat într-o anumită direcție este mai mare acolo unde valorile funcției de undă sunt mai mari. Cu alte cuvinte, unele electronului sunt unde care reprezintă *ceva*; semnificația lor este că valoarea funcției de undă în orice punct ne dă probabilitatea ca electronul să se afle în acel punct sau în apropierea lui.

Nici Schrödinger și nici de Broglie nu s-au împăcat cu această interpretare a undelor electronului, ceea ce explică probabil de ce nici unul dintre ei nu a mai adus o contribuție importantă la dezvoltarea ulterioară a mecanicii cuantice. Dar interpretarea probabilistică a undelor electronului a fost susținută de un remarcabil argument adus de Heisenberg în anul următor. Heisenberg a studiat problemele cu care se confruntă un fizician care încearcă să măsoare poziția și impulsul unui electron. Pentru a efectua o măsurare precisă a poziției e necesară folosirea unei lumini cu lungime de undă mică, deoarece difracția estompează imaginea oricărui obiect mai mic decât lungimea de undă a luminii. Dar lumina cu lungime de undă scurtă e alcătuită din fotoni cu impuls mare, iar, când fotonii cu impuls mare sunt folosiți pentru a observa un electron, acesta suferă un recul în urma impactului, preluând o parte din impulsul fotonului. Astfel, cu cât încercăm să determinăm mai precis poziția unui electron, cu atât știm mai puțin despre impulsul electronului după măsurătoare. Această regulă a ajuns să fie cunoscută ca *principiul de incertitudine al lui Heisenberg*.^{*} O undă

^{*} Pentru a fi mai exacti, deoarece lungimea de undă a luminii este egală cu constanta lui Planck împărțită la impulsul fotonului, incertitudinea asupra poziției unei particule nu poate fi mai mică decât această constantă împărțită la incertitudinea asupra impulsului său. Nu observăm această incertitudine pentru obiectele obișnuite cum ar fi bilele de biliard deoarece constanta lui Planck e foarte mică. În sistemul de unități cel mai familiar fizicienilor, bazat pe centimetru, gram și secundă ca unități fundamentale de lungime, masă

a electronului având un maximum pronunțat într-o anumită poziție reprezintă un electron care are o poziție destul de bine definită, dar un impuls ce poate lua aproape orice valoare. Dimpotrivă, o undă a electronului care ia forma unei alternări domoale de creste și văi aflate la distanțe egale și întinzându-se pe mai multe lungimi de undă reprezintă un electron care are un impuls destul de bine definit, dar a cărui poziție e extrem de incertă. Electronii mai frecvent întâlniți, cum sunt cei din atomi sau molecule, nu au nici poziția, nici impulsul bine definite.

Fizicienii au continuat disputa privind interpretarea mecanicii cuantice ani de-a rândul după ce s-au obișnuit să rezolve ecuația lui Schrödinger. Einstein a adoptat o poziție atipică respingând mecanica cuantică; cei mai mulți fizicieni încercau pur și simplu s-o înțeleagă. O mare parte a acestei dispute s-a consumat la Institutul Universitar pentru Fizică Teoretică din Copenhaga, sub îndrumarea lui Niels Bohr*. Bohr s-a concentrat în special asupra unei anumite trăsături a mecanicii cuantice pe care a numit-o *complementaritate*: cunoașterea unui aspect al unui sistem împiedică cunoașterea altor aspecte ale sistemului. Principiul de incertitudine al lui Heisenberg este un exemplu de complementaritate: cunoașterea poziției unei particule (sau a impulsului) împiedică cunoașterea impulsului (sau a poziției)**.

și timp, constanta lui Planck este de 6,626 miimi de milionimi de milionimi de milionimi de milionimi, deci o virgulă urmată de douăzeci și șase de zerouri și apoi 6626. Constanta lui Planck este atât de mică, încât lungimea de undă a unei bile de biliard rostogolindu-se pe o masă este mult mai mică decât dimensiunea unui nucleu atomic, astfel încât nu e dificil să măsoari simultan cu precizie poziția și impulsul bilei. (N.a.)

* Am avut marele noroc să-l întâlnesc pe Bohr către sfârșitul carierei sale și începutul carierei mele. Bohr a fost gazda mea la institutul din Copenhaga, în primul meu an de studii postuniversitare. Oricum, am discutat puțin și nu am reținut mare lucru – Bohr mai mult mormăia și îmi era de fiecare dată greu să înțeleg ce voia să spună. Îmi amintesc privirea înmărmurită a soției mele când Bohr i-a vorbit în cele din urmă la o petrecere dată în sera casei sale, iar ea și-a dat seama că nu înțelegea absolut nimic din ce spunea marele om. (N.a.)

** În ultimii ani ai vieții sale, Bohr a accentuat importanța complementarității în domenii îndepărtate de fizică. Potrivit unei relatări, Bohr a

Prin anii '30, discuțiile de la institutul lui Bohr au condus la formularea ortodoxă „a școlii de la Copenhaga” privind mecanica cuantică, în termeni mult mai generali decât mecanica ondulatorie a electronilor singulari. Dacă un sistem e alcătuit din una sau mai multe particule, starea sa în orice moment e descrisă de lista numerelor cunoscute ca valori ale funcției de undă, câte un număr pentru fiecare configurație posibilă a sistemului. Aceeași stare poate fi descrisă dând valorile funcției de undă pentru configurații ce sunt caracterizate în diferite moduri – de exemplu prin pozițiile tuturor particulelor din sistem, prin impulsurile tuturor particulelor din sistem sau altcumva, dar nu prin pozițiile și impulsurile tuturor particulelor.

Esența interpretării școlii de la Copenhaga e o separare netă între sistemul în sine și instrumentul folosit pentru a-i măsura configurația. După cum a subliniat Max Born, în intervalele dintre măsurători valorile funcției de undă evoluează într-un mod perfect continuu și determinist, dictat de o versiune generală a ecuației Schrödinger. În acest timp, nu se poate spune că sistemul se află într-o configurație bine definită. Dacă măsurăm configurația sistemului (de exemplu prin măsurarea tuturor pozițiilor particulelor sau a tuturor impulsurilor acestora, dar nu ambele), sistemul trece într-o stare care se află în mod cert într-o configurație sau o alta, cu probabilități date de pătratele valorilor funcției de undă pentru aceste configurații exact în momentul dinaintea măsurătorii.

Dacă prezinți mecanica cuantică folosind doar cuvinte, dai inevitabil numai o impresie vagă despre ea. Mecanica cuantică în sine nu e vagă; deși pare stranie la prima vedere, ea oferă un cadru precis pentru calcularea energiilor, ratelor de tranziție și a probabilităților. Vreau să încerc să-l conduc pe cititor ceva mai adânc în mecanica cuantică, iar în acest scop voi lua în acum considerare cel mai simplu tip de sistem cu puțință, unul care are numai două configurații posibile. Putem privi acest sistem ca pe o particulă imaginară având doar două poziții posibile, în loc de o infinitate – de pildă, *aici* și

fost întrebat odată în germană care este calitatea complementară adevărului (în germană *Wahrheit*). După ce s-a gândit un timp, a răspuns: claritatea (*Klarheit*). Am simțit forța acestei remarci scriind prezentul capitol. (N. a.)

acolo. Starea sistemului la orice moment e deci descrisă de două numere: valorile funcției de undă *aici* și *acolo*.

În fizica clasică, descrierea particulei noastre imaginare e foarte simplă: ea se află cu certitudine sau *aici* sau *acolo*, deși poate sări de *aici acolo* sau viceversa într-o manieră dictată de anumite legi dinamice. Lucrurile se complică mult în mecanica cuantică. Când nu observăm particula, starea sistemului poate fi *aici* pur, caz în care valoarea *acolo* a funcției de undă devine nulă, sau *acolo* pur, caz în care valoarea *aici* a funcției de undă devine nulă, dar este de asemenea posibil (și mai probabil) ca nici o valoare să nu se anuleze, iar particula să nu fie cu certitudine nici *aici*, nici *acolo*. Dacă vrem să știm unde este particula, *aici* sau *acolo*, vom afla desigur că este într-o poziție sau alta; probabilitatea ca rezultatul să fie *aici* este dată de pătratul valorii *aici* exact dinaintea măsurătorii, iar probabilitatea ca ea să fie *acolo* este dată de pătratul valorii *acolo*. După interpretarea școlii de la Copenhaga, când măsurăm dacă particula este în configurația *aici* sau *acolo*, valorile funcției de undă fac un salt către noi valori; fie valoarea *aici* devine egală cu unu și valoarea *acolo* egală cu zero, fie invers, dar cunoașterea funcției de undă nu ne permite să prezicem care dintre situații va apărea, ci doar probabilitățile lor.

Sistemul cu numai două configurații e atât de simplu încât ecuația Schrödinger asociată poate fi descrisă fără simboluri. În intervalele dintre măsurători rata de variație a valorii *aici* a funcției de undă este o anumită constantă înmulțită cu valoarea *aici* plus o a doua constantă înmulțită cu valoarea *acolo*; rata de variație a valorii *acolo* este o a treia constantă înmulțită cu valoarea *aici* plus o a patra constantă înmulțită cu valoarea *acolo*. Ansamblul acestor patru constante se numește *hamiltonianul* acestui sistem simplu. Hamiltonianul caracterizează sistemul în sine, și nu o stare particulară a sa; el ne spune tot ce putem ști despre felul în care evoluează starea sistemului pornind de la orice condiții inițiale. Mecanica cuantică singură nu ne spune cum e hamiltonianul – hamiltonianul trebuie dedus din cunoștințele noastre experimentale și teoretice asupra naturii sistemului în cauză.

Acest sistem simplu poate fi folosit și pentru a ilustra ideea lui Bohr de complementaritate, luând în considerare alte moduri de a descrie starea aceleiași particule. De exemplu, există o pereche

de stări, ceva asemănător stărilor de impuls bine definit, pe care le putem numi *stop* și *start*, în care valoarea *aici* a funcției de undă este egală cu valoarea *acolo* și, respectiv, cu minus valoarea *acolo*. Putem descrie funcția de undă în termenii valorilor sale *stop* și *start*, în loc de valorile *aici* și *acolo*: valoarea *stop* este suma valorilor *aici* și *acolo*, iar valoarea *start* este diferența lor. Dacă știm că poziția particulei este cu certitudine *aici*, atunci valoarea *acolo* a funcției de undă trebuie să fie zero, iar astfel valorile *stop* și *start* ale funcției de undă trebuie să fi egale, ceea ce înseamnă că nu cunoaștem nimic despre impulsul particulei; ambele posibilități au o probabilitate de 50%. Invers, dacă știm că particula este cu certitudine în starea *stop* cu impuls zero, atunci valoarea *start* a funcției de undă e zero și, deoarece valoarea *start* este diferența dintre valorile *aici* și *acolo*, valorile *aici* și *acolo* trebuie să fie egale, ceea ce înseamnă că nu știm nimic despre poziția particulei; ea se poate afla *aici* sau *acolo* cu o probabilitate de 50%. Observăm că există o perfectă complementaritate între o măsurătoare *aici-sau-acolo* și una *stop-sau-start*: putem efectua una sau alta dintre măsurători, dar, pe oricare dintre ele am alege-o, rămânem în totală necunoaștință privind rezultatele pe care le-am obține dacă am efectua celălalt tip de măsurătoare.

Toată lumea este de acord asupra modului de aplicare a mecanicii cuantice, dar există un serios dezacord asupra interpretării a ceea ce facem când o folosim. Pentru cei care s-au simțit afectați de reducționismul și determinismul fizicii newtoniene, două aspecte ale mecanicii cuantice păreau să ofere un leac bine-venit. Dacă oamenii nu au un statut aparte în fizica newtoniană, în interpretarea școlii de la Copenhaga a mecanicii cuantice oamenii joacă un rol esențial în conferirea unui sens funcției de undă prin actul măsurării. Iar dacă fizicianul newtonian vorbea despre predicții precise, fizicianul mecanicii cuantice oferă acum doar calcule ale probabilităților, părănd astfel să lase loc pentru liberul arbitru sau pentru intervenția divină.

Unii oameni de știință și autori precum Fritjof Capra au primit cu bucurie ceea ce ei considerau a fi un prilej de reconciliere între spiritul științei și sensibilitatea noastră. La fel aș fi reacționat și eu dacă aș fi crezut că această ocazie este una reală, dar nu cred că e. Mecanica cuantică a avut o importanță covârșitoare în fizică,

dar nu pot găsi în mecanica cuantică vreun mesaj pentru viața omului esențialmente diferit de cel din fizica newtoniană.

Din moment ce subiectul e încă viu dezbătut, am convins două cunoscute personaje să poarte o discuție pe această temă.*

DIALOG DESPRE SEMNIFICAȚIA MECANICII CUANTICE

MICUL TIM: Cred că mecanica cuantică e pur și simplu minunată. Nu mi-a plăcut niciodată că în mecanica newtoniană, dacă știai poziția și viteza fiecărei particule la un anumit moment, puteai prezice totul despre viitor, fără să mai existe loc pentru liberul-arbitru și fără ca oamenii să joace un rol deosebit. Acum, în mecanica cuantică, toate predicțiile sunt vagi și probabilistice, iar nici un lucru nu are o stare precisă până când oamenii nu-l observă. Sunt sigur că vreun mistic oriental trebuie să fi spus ceva asemănător.

SCROOGE: Hmmm! Mi-oi fi schimbat eu părerea despre Crăciun, dar mai pot încă recunoaște o escrocherie când dau de ea. E drept că electronul nu are simultan poziția și impulsul bine precizate, dar asta nu înseamnă decât că aceste două cantități nu sunt potrivite pentru a descrie electronul. Ce are într-adevăr un electron sau orice ansamblu de particule în orice moment este o funcție de undă. Dacă există un om care observă particulele, atunci starea întregului sistem, inclusiv omul, e descrisă de o funcție de undă. Evoluția funcției de undă e la fel de deterministă ca orbitele particulelor în mecanica newtoniană. De fapt, e încă mai deterministă, fiindcă ecuațiile care ne spun cum evoluează funcția de undă în timp sunt prea simple pentru a admite soluții haotice. Unde vezi tu liber-arbitru?

MICUL TIM: Sunt pur și simplu surprins cât de neștiințific e răspunsul dumneavoastră. Funcția de undă nu are o realitate

* Micul Tim și Scrooge sunt personaje din nuvela lui Dickens *Un colind de Crăciun*. (N. red.)

obiectivă, din moment ce nu poate fi măsurată. De pildă, dacă observăm că o particulă este *aici*, nu putem trage concluzia că funcția de undă *dinaintea* observației avea valoarea *acolo* egală cu zero; putea avea orice valori *aici* și *acolo*, particula apărând întâmplător *aici*, și nu *acolo*, atunci când a fost observată. Din moment ce funcția de undă nu e reală, de ce puneți atâta accent pe faptul că evoluează determinist? Tot ce putem măsura sunt mărimi precum poziția, impulsul sau spinul, iar în privința lor nu putem prezice decât probabilități. Iar, până când nu intervine un om pentru a măsura aceste mărimi, nu putem spune că particula are vreo stare bine definită.

SCROOGE: Tinere dragă, se pare că ai acceptat fără spirit critic doctrina secolului XIX numită pozitivism, care spune că știința ar trebui să se ocupe numai de lucrurile ce pot fi observate direct. Sunt de acord că nu poți măsura o funcție de undă într-un singur experiment. Și ce-i cu asta? Prin măsurători repetate de multe ori pentru aceleași condiții inițiale, poți deduce care trebuie să fie funcția de undă în acea stare și poți folosi rezultatele pentru a verifica teoriile noastre. Ce vrei mai mult? Trebuie să gândești ca în secolul XX. Funcțiile de undă sunt reale din aceleași motive pentru care sunt reale simetriile și sunt reali cuarcii – fiindcă este util să le includem în teoriile noastre. Orice sistem se află într-o stare bine definită *indiferent dacă oamenii îl observă sau nu*; starea nu e descrisă de o poziție sau un impuls, ci de o funcție de undă.

MICUL TIM: N-am de gând să discut în contradictoriu despre ce e real și ce nu cu cineva care își petrece nopțile plimbându-se cu fantome. Permiteți-mi doar să vă amintesc o dificultate gravă cu care vă confrunțați dacă vă închipuiți că funcția de undă e reală. Această problemă a fost menționată într-un atac asupra mecanicii cuantice lansat de Einstein în 1933 la conferința Solvay de la Bruxelles, iar apoi în 1935 într-un faimos articol scris împreună cu Boris Podolsky și Nathan Rosen. Să presupunem că avem un sistem alcătuit din doi electroni, aranjat astfel încât la un anumit moment electronii se află la o distanță cunoscută, suficient de mare, și au un impuls total cunoscut. (Aceasta nu violează principiul de incertitudine al lui Heisenberg. De exemplu, distanța dintre ei poate

fi măsurată cu precizie oricât de mare trimițând raze de lumină cu o lungime de undă foarte scurtă de la un electron la altul; aceasta va perturba impulsul fiecărui electron, dar din cauza conservării impulsului nu va modifica impulsul lor *total*.) Dacă cineva măsoară apoi impulsul primului electron, impulsul celui de-al doilea electron poate fi imediat calculat, deoarece suma lor e cunoscută. Pe de altă parte, dacă cineva măsoară poziția primului electron, atunci poziția celui de-al doilea electron poate fi imediat calculată, deoarece distanța dintre ei e cunoscută. Dar asta înseamnă că, prin observarea stării primului electron, poți modifica instantaneu funcția de undă, așa încât al doilea electron să aibă o poziție sau un impuls bine precizate, *cu toate că niciodată nu te apropii de cel de-al doilea electron*. Chiar puteți accepta că funcțiile de undă sunt reale dacă pot fi modificate în acest fel?

SCROOGE: Sunt de acord cu acest argument. Nu-mi fac griji în privința regulii din teoria specială a relativității care interzice transmiterea semnalelor cu viteză mai mare decât viteza luminii; nu există nici o contradicție. Un fizician care măsoară impulsul celui de-al doilea electron nu are cum să știe că valorile pe care le găsește au fost afectate de observațiile asupra primului electron. Tot ce știe el e că înaintea măsurătorii electronul ar fi putut avea o poziție bine definită sau un impuls bine definit. Nici măcar Einstein n-ar fi putut folosi acest tip de măsurătoare pentru a transmite semnale instantanee de la un electron la altul. (Fiindcă ai pomenit despre asta, puteai menționa și că John Bell a găsit consecințe încă mai stranii ale mecanicii cuantice legate de spinii atomului, iar fizicienii experimentatori au demonstrat că în sistemele atomice spinii se comportă într-adevăr după cum prevede mecanica cuantică, dar așa e făcută lumea). Mi se pare că nimic din toate acestea nu ne împiedică să considerăm că funcția de undă e reală; ea se comportă pur și simplu într-un fel cu care nu suntem obișnuiți, de pildă pot apărea schimbări instantanee care afectează funcția de undă a întregului univers. Cred că ar trebui să încetezi să mai cauți mesaje filozofice profunde în mecanica cuantică și să mă lași s-o folosesc.

MICUL TIM: Cu tot respectul, trebuie să vă spun că, dacă acceptați schimbări instantanee ale funcției de undă în întregul spațiu, mi se pare că puteți accepta orice. În orice caz, sper că mă veți ierta dacă vă voi spune că vă contraziceți. Ați spus că funcția de undă a oricărui sistem evoluează într-un mod perfect determinist și că probabilitățile își fac apariția doar în momentul în care facem măsurători. Dar, din punctul dumneavoastră de vedere, nu numai electronul, ci și aparatul de măsură și observatorul uman care îl folosește alcătuiesc împreună un mare sistem, descris de o funcție de undă cu un număr imens de valori, evoluând cu toate determinist chiar și în timpul măsurătorii. Deci, dacă totul are loc în mod determinist, atunci cum poate exista vreo incertitudine în legătură cu rezultatele măsurătorilor? De unde apar probabilitățile când sunt efectuate măsurătorile?

Nutresc simpatie pentru ambele părți implicate în această discuție, deși poate ceva mai multă pentru realistul Scrooge decât pentru pozitivistul Tim. I-am lăsat Micului Tim ultima replică fiindcă problema pe care o pune în final a constituit cel mai mare mister legat de interpretarea mecanicii cuantice. Interpretarea ortodoxă a școlii de la Copenhaga pe care am prezentat-o până acum se bazează pe o netă separare între sistemul fizic, guvernat de regulile mecanicii cuantice, și aparatul folosit la studierea lui, care e descris clasic, adică în conformitate cu legile precuantice ale fizicii. Particula noastră imaginară poate avea o funcție de undă cu ambele valori *aici* și *acolo*, dar când e observată devine cumva fie *aici*, fie *acolo*, într-un mod care e esențialmente imprevizibil, abstracție făcând de probabilități. Dar această deosebire în felul în care tratăm sistemul aflat sub observație și aparatul de măsură e în mod cert o ficțiune. Credem că mecanica cuantică guvernează totul în univers, nu doar electroni, atomi și molecule individuale, ci și aparatul experimental și fizicienii care îl folosesc. Dacă funcția de undă descrie deopotrivă aparatul de măsură și sistemul aflat sub observație și dacă evoluează *determinist* în conformitate cu legile mecanicii cuantice chiar și în timpul măsurătorii, atunci, după cum se întreabă și Micul Tim, de unde apar probabilitățile?

Nemulțumirea creată de disocierea artificială între sisteme și observatori din interpretarea școlii de la Copenhaga i-a condus pe mulți teoreticieni la o perspectivă foarte diferită: interpretarea *luminilor multiple* sau a *istoriilor multiple*, prezentată pentru prima dată de Hugh Everett în teza sa de doctorat susținută la Princeton. Conform acestei perspective, o măsurătoare *aici*-sau-*acolo* asupra particulei noastre imaginare constă într-un anumit tip de interacție între particulă și aparatul de măsură, astfel încât funcția de undă a sistemului combinat are valori mari numai pentru două configurații; o valoare corespunde configurației în care particula este *aici* și cadranul aparatului indică *aici*; cealaltă corespunde posibilității ca particula să fie *acolo* și cadranul aparatului să indice *acolo*. Există în continuare o funcție de undă bine definită, produsă într-un mod complet determinist de interacția particulei cu aparatul de măsură, în conformitate cu legile mecanicii cuantice. Totuși, cele două valori ale funcției de undă corespund unor stări cu energii diferite și, deoarece aparatul de măsură e macroscopic, această diferență de energii e foarte mare, așa încât aceste două valori oscilează cu frecvențe foarte diferite. Observarea poziției acului pe cadranul aparatului de măsură seamănă cu acordarea la întâmplare a unui radio pe una din două stații de emisie, KAICI și WACOLO; atâta timp cât frecvențele celor două posturi sunt bine separate, nu există interferențe și se recepționează fie o stație, fie alta, cu probabilități proporționale cu intensitățile lor. Absența interferenței între cele două valori ale funcției de undă face ca istoria lumii să se despartă în două istorii separate – una în care particula e *aici* și alta în care particula e *acolo* –, iar fiecare dintre aceste istorii se va desfășura de acum înainte fără a interacționa cu cealaltă.

Aplicând regulile mecanicii cuantice sistemului combinat particulă plus aparat de măsură, se poate demonstra că probabilitatea de a găsi particula *aici*, cu acul cadranului indicând *aici* este proporțională cu pătratul valorii *aici* a funcției de undă a particulei exact înainte să înceapă să interacționeze cu aparatul de măsură, după cum e postulat în interpretarea școlii de la Copenhaga. Acest argument nu răspunde însă cu adevărat întrebării lui Tim. Calculând probabilitatea ca sistemul combinat particulă-aparat de măsură să fie într-una din configurații, introducem implicit un observator care

privește cadranul și vede dacă acul indică *aici* sau *acolo*. Deși în această analiză aparatul de măsură a fost tratat cuantic, observatorul a fost tratat clasic; el găsește că acul cadranului indică precis fie *aici*, fie *acolo* într-un mod care din nou nu poate fi prezis decât în termeni de probabilități. Desigur, am putea trata cuantic și observatorul, dar numai cu prețul introducerii unui alt observator, care detectează concluziile primului, probabil citind un articol dintr-o revistă de fizică. Și așa mai departe.

Numeroși fizicieni au încercat să epureze bazele mecanicii cuantice de orice afirmație privind probabilitățile sau orice alt postulat interpretativ care face distincția între sisteme și observatori. Pentru aceasta ar fi nevoie de un model cuantic cu o funcție de undă care să descrie nu numai diferitele sisteme studiate, dar și ceva reprezentând un observator conștient. Cu un asemenea model, am putea încerca să demonstrăm că, urmare a *repetatelor* interacțiuni ale observatorului cu sistemele individuale, funcția de undă a sistemului combinat evoluează cu certitudine către o funcție de undă finală, în care observatorul s-a convins că probabilitățile măsurătorilor individuale sunt cele prescrise de interpretarea școlii de la Copenhaga. Nu sunt convins că acest program a fost până acum încununat de succes, dar cred că în cele din urmă s-ar putea să fie. În acest caz, realismul lui Scrooge ar fi pe deplin justificat.

Este cu adevărat surprinzător cât de puțin contează toate acestea. Cei mai mulți fizicieni folosesc mecanica cuantică zi de zi, fără să se sinchisească de problema fundamentală a interpretării sale. Fiind oameni rezonabili, având prea puțin timp pentru a urmări ideile și rezultatele din domeniul lor și nefiind obligați să-și facă griji în privința acestei probleme fundamentale, chiar nu-și fac griji. Cu un an în urmă, în timp ce așteptam liftul împreună cu Philip Candelas (de la departamentul de fizică din Texas) conversația noastră s-a îndreptat asupra unui tânăr teoretician care fusese o mare promisiune pe vremea studenției, dar despre care apoi n-am mai auzit nimic. L-am întrebat pe Phil ce s-a întâmplat cu cercetările fostului său student. Phil a dat din cap cu tristețe și a zis: „A încercat să înțeleagă mecanica cuantică.”

Atât de irelevantă este filozofia mecanicii cuantice pentru utilizarea ei, încât am început să bănuim că toate întrebările profunde

despre semnificația măsurătorilor sunt într-adevăr goale și ne-au fost impuse de limbajul nostru, un limbaj care s-a dezvoltat într-o lume guvernată aproape total de fizica clasică. Recunosc însă că simt o oarecare stânjeneală pentru că toată viața mea am lucrat într-un cadru teoretic pe care nimeni nu-l înțelege pe deplin. Iar noi avem într-adevăr nevoie să înțelegem mai bine mecanica cuantică în cosmologia cuantică, aplicarea mecanicii cuantice la întregul univers, pentru care nici nu se poate imagina un observator extern. Universul e în prezent mult prea mare pentru ca mecanica cuantică să introducă vreo diferență semnificativă, dar conform teoriei big bang a existat un moment în trecut când particulele erau atât de apropiate unele de altele încât efectele cuantice trebuie să fi fost importante. Deocamdată nimeni nu cunoaște nici măcar regulile pentru aplicarea mecanicii cuantice în acest context.

De un și mai mare interes mi se pare întrebarea dacă mecanica cuantică este în mod necesar *adevărată*. Mecanica cuantică a avut un succes fenomenal în explicarea proprietăților particulelor, atomilor și moleculelor, așa încât știm că este o foarte bună aproximație a adevărului. Problema e dacă există o altă teorie logic posibilă ale cărei predicții sunt foarte apropiate, dar nu identice cu cele ale mecanicii cuantice. Pentru majoritatea teoriilor fizice e ușor să-ți închipui cum le-ai putea aduce mici modificări. De exemplu, legea newtoniană a gravitației, care spune că forța gravitațională dintre două particule scade cu inversul pătratului distanței dintre ele, poate fi schimbată puțin presupunând că forța scade cu o altă putere a distanței, apropiată de inversul pătratului, dar nu riguros egală. Pentru a testa experimental teoria lui Newton am putea compara observațiile asupra sistemului solar cu ceea ce ar fi de așteptat din partea unei forțe care scade cu o anumită putere nedeterminată a distanței, iar astfel am stabili o limită pentru abaterea acestei puteri de la inversul pătratului. Chiar și teoria generală a relativității ar putea fi ușor modificată, incluzând, de pildă, mici termeni mai complicați în ecuațiile câmpului sau introducând în teorie noi câmpuri care interacționează slab. Uimitor e faptul că până în prezent nu s-a putut găsi o teorie logic coerentă apropiată de mecanica cuantică, alta decât însăși mecanica cuantică.

Am încercat să construiesc o asemenea teorie în urmă cu câțiva ani. Scopul meu nu era să propun o alternativă la mecanica cuantică, ci doar să am o teorie cu predicții asemănătoare, dar nu identice, celor din mecanica cuantică, pentru a servi drept termen de comparație în testele experimentale. Încercam astfel să dau fizicienilor experimentatori o idee despre tipul de experimente care ar putea oferi teste cantitative interesante privind validitatea mecanicii cuantice. Trebuia testată mecanica cuantică însăși, nu o anume teorie cuantică precum modelul standard, așa încât, pentru a distinge experimental între mecanica cuantică și alternativele sale, trebuia verificată o trăsătură foarte generală a oricărei teorii cuantice posibile. Pentru a inventa o alternativă la mecanica cuantică m-am legat de acea trăsătură generală a ei care mi s-a părut întotdeauna ceva mai arbitrară decât celelalte, și anume *linearitatea* ei.

Trebuie să explic aici ce înseamnă linearitate. Amintiți-vă că valorile funcției de undă a oricărui sistem se modifică cu rate ce depind de aceste valori, precum și de natura sistemului și de mediul în care se află. De exemplu, rata modificării valorii *aici* pentru particula noastră imaginară e o constantă înmulțită cu valoarea *aici* plus o altă constantă înmulțită cu valoarea *acolo*. O lege dinamică de acest tip particular se numește lineară deoarece, dacă modificăm o valoare a funcției de undă la orice moment și trasăm graficul pentru orice valoare a funcției de undă la orice moment ulterior în funcție de valoarea care a fost modificată, atunci, presupunând că toate celelalte lucruri rămân neschimbate, graficul e o linie dreaptă. Simplu spus, răspunsul sistemului la orice modificare a stării sale e proporțional cu acea modificare. O consecință foarte importantă a acestei linearități este că, după cum sublinia și Scrooge, sistemele cuantice nu pot fi haotice; o mică schimbare în condițiile inițiale produce doar o mică schimbare în valorile funcției de undă la orice moment ulterior.

Există multe sisteme clasice care sunt lineare în acest sens, dar linearitatea din fizica clasică nu e niciodată riguroasă. Dimpotrivă, mecanica cuantică se presupune că e riguros lineară în toate împrejurările. Dacă încerci să găsești un mod de a schimba mecanica

cuantică, e firesc să iei în considerare posibilitatea ca evoluția funcției de undă să nu fie în cele din urmă riguros lineară.

După câteva încercări am ajuns la o alternativă ușor nelineară a mecanicii cuantice care părea să aibă sens fizic și putea fi ușor testată cu foarte mare precizie verificând o consecință generală a linearității, aceea că frecvențele de oscilație ale oricărui tip de sistem linear nu depind de modul în care oscilațiile sunt excitate. De exemplu, Galilei a observat că frecvența cu care oscilează un pendul nu depinde de mărimea acestor oscilații. Aceasta deoarece, atâta timp cât amplitudinea oscilațiilor e suficient de mică, pendulul este un sistem linear; ratele de modificare a deplasării și impulsului sunt respectiv proporționale cu impulsul și deplasarea. Toate ceasurile se bazează pe această proprietate a oscilațiilor sistemelor lineare, indiferent că e vorba de un pendul, un arc sau un cristal de cuarț. Cu câțiva ani în urmă, după o discuție cu David Wineland de la Biroul Național de Standarde, mi-am dat seama că nucleele în mișcare de rotație folosite ca standarde ale măsurării timpului ofereau un minunat test pentru linearitatea mecanicii cuantice; în alternativa mea ușor nelineară a mecanicii cuantice, frecvența de precesie a axei de rotație a nucleului în jurul unui câmp magnetic depindea foarte puțin de unghiul dintre axa de rotație și câmpul magnetic. Faptul că un asemenea efect nu a fost observat la Biroul de Standarde mi-a arătat imediat că eventualele efecte nelineare din nucleul studiat (un izotop al beriliului) nu pot contribui la energia nucleului cu mai mult de unu la un miliard de miliarde de miliarde. De atunci, Wineland și alți experimentatori de la Harvard, Princeton și alte laboratoare au îmbunătățit aceste măsurători, astfel încât acum știm că efectele nelineare ar trebui să fie încă și mai mici. Linearitatea mecanicii cuantice, admițând că ar fi doar aproximativă, este în cele din urmă o aproximație foarte bună.

Nimic nu era cu adevărat surprinzător. Chiar dacă există mici corecții nelineare la mecanica cuantică, nu aveam nici un motiv să credem că aceste corecții ar fi suficient de mari pentru a fi detectate la primele experimente concepute pentru a le pune în evidență. Ce m-a dezamăgit a fost însă faptul că această alternativă nelineară la mecanica cuantică s-a dovedit că se confruntă cu dificultăți interne

de natură pur teoretică. În primul rând, nu am putut găsi nici un mod de a extinde versiunea nelineară a mecanicii cuantice la teorii bazate pe relativitatea specială a lui Einstein. Apoi, după ce articolul meu a fost publicat, atât N. Gisin de la Geneva, cât și colegul meu Joseph Polchinsky de la Universitatea din Texas au arătat în mod independent că în experimentul mintal Einstein-Podolsky-Rosen menționat de Micul Tim nelinearitățile teoriei generale *ar putea* fi folosite pentru a transmite instantaneu semnale la mari distanțe, rezultat interzis de relativitatea specială. Cel puțin pentru moment am renunțat să mă ocup de această problemă; pur și simplu nu știu cum să modific puțin mecanica cuantică fără s-o distrug cu totul.

Chiar mai mult decât verificarea experimentală precisă a linearității, acest eșec teoretic de a găsi o alternativă plauzibilă a mecanicii cuantice mă face să cred că mecanica cuantică este așa cum este pentru că orice mică modificare a ei ar conduce la absurdități logice. Dacă acest lucru e adevărat, atunci mecanica cuantică ar putea fi o parte permanentă a fizicii. Într-adevăr, mecanica cuantică ar putea supraviețui nu numai ca o aproximare a unui adevăr mai profund, așa cum teoria newtoniană a gravitației supraviețuiește ca o aproximare a teoriei relativității generale, ci ca o trăsătură riguros valabilă a teoriei finale.

CAPITOLUL V

Povestiri despre teorie și experiment

*Îmbătrânind
Lumea devine mai ciudată, mai complicat modelul
Morții și al vieții. Nu clipa intensă,
Izolată, ce nici nu începe, nici nu se sfârșește,
Ci-arzând în fiecare clipă, întreaga viață.*

T.S. ELIOT, *East Coker*

Aș vrea acum să vă spun trei povestiri despre progresele din fizica secolului XX. Un lucru straniu reiese din aceste povestiri: de multe ori fizicienii au fost călăuziți de simțul frumosului nu numai în elaborarea noilor teorii, dar și în judecarea validității teoriilor fizice existente. Se pare că învățăm să presimțim frumusețea naturii la nivelul ei cel mai adânc. Nimic nu ne-ar putea da mai multe speranțe că ne îndreptăm cu adevărat spre descoperirea legilor ultime ale naturii.

Prima povestire se referă la teoria relativității generale, teoria lui Einstein despre gravitație. Einstein a elaborat această teorie în anii 1907–1915 și a făcut-o cunoscută într-o serie de articole între 1915 și 1916. Foarte pe scurt, în locul descrierii newtoniene a gravitației ca o atracție între toate corpurile masive, relativitatea generală prezintă gravitația ca un efect al curbării spațiului-timp produse de materie și energie. Pe la mijlocul anilor '20, această teorie revoluționară a fost unanim acceptată drept adevărata teorie a gravitației, statut pe care și l-a păstrat până în prezent. Cum s-a întâmplat asta?

În 1915, Einstein și-a dat imediat seama că teoria sa pune capăt unui vechi conflict între unele observații asupra sistemului solar și teoria newtoniană. Încă din 1859 își făcuse apariția o dificultate în înțelegerea orbitei planetei Mercur în cadrul teoriei lui

Newton. În conformitate cu mecanica și teoria gravitației newtoniene, dacă nu ar exista nimic în univers cu excepția Soarelui și a unei singure planete, planeta s-ar mișca pe o elipsă perfectă în jurul Soarelui. Orientarea elipsei – direcția axei lungi și a celei scurte – nu s-ar schimba niciodată, ca și cum orbita planetei ar fi fixată în spațiu. Deoarece însă sistemul solar conține și alte planete care perturbă ușor câmpul gravitațional al Soarelui, orbitele eliptice ale tuturor planetelor au o mișcare de precesie, adică se rotesc încet în spațiu. În secolul XIX s-a dovedit că orbita planetei Mercur își schimbă orientarea cu un unghi de aproximativ 575 de secunde într-un secol. (Un grad are 3 600 de secunde.) Teoria newtoniană prezice însă pentru precesia orbitei lui Mercur 532 de secunde pe secol, o diferență de 43 de secunde pe secol. Altfel spus, dacă aștepti 225 000 de ani, orbita eliptică, după ce a făcut o rotație completă de 360 de grade, va avea orientarea inițială, pe când teoria lui Newton prezice că acest lucru ar dura 244 000 de ani – nu e o discrepanță spectaculoasă, dar faptul i-a tulburat pe astronomi vreme de mai bine de o jumătate de secol. Când în 1915 Einstein a calculat consecințele aplicării noii sale teorii, a găsit imediat că aceasta explică precesia cu 43 de secunde pe secol mai mare a orbitei lui Mercur. (Una din cauzele care contribuie la această precesie suplimentară din teoria lui Einstein este câmpul gravitațional suplimentar produs de energia câmpului gravitațional însuși. În teoria newtoniană a gravitației, câmpul gravitațional este produs doar de masă, nu și de energie, neexistând un asemenea câmp suplimentar.) Mai târziu Einstein avea să-și aducă aminte că vreme de câteva zile după acest succes nu-și mai încăpea în piele de bucurie.

După război astronomii au supus teoria relativității unui test experimental suplimentar, măsurarea devierii razelor luminoase provocată de Soare în timpul eclipsei solare din 1919. În teoria lui Einstein, fotonii dintr-o rază de lumină sunt deviați de câmpul gravitațional al Soarelui cam la fel cum o cometă care vine de la mare distanță și intră în sistemul solar e deviată de gravitația Soarelui, ocolindu-l și întorcându-se în spațiul interstelar de unde a venit. Desigur, devierea unei raze de lumină e mult mai mică decât devierea unei comete deoarece lumina călătorește mult mai repede, după cum o cometă rapidă este deviată mai puțin decât

una lentă. Dacă relativitatea generală e corectă, devierea unei raze de lumină ce trece foarte aproape de suprafața Soarelui este de 1,75 secunde, aproximativ 5 zecimi de miimi dintr-un grad. (Astronomii trebuie să aștepte o eclipsă de Soare pentru a măsura această deviere deoarece trebuie să observe curbarea unor raze luminoase provenite de la o stea îndepărtată în momentul în care acestea trec prin apropierea Soarelui, și, evident, e greu să vezi stelele din apropierea Soarelui, cu excepția cazului în care lumina Soarelui e obturată de Lună în timpul unei eclipse. Astronomii măsoară deci poziția câtorva stele de pe firmament cu șase luni înainte de eclipsă, când Soarele se află de cealaltă parte a cerului, apoi așteaptă șase luni până în momentul eclipsei și stabilesc cu cât anume deviază Soarele lumina provenind de la stea măsurând deplasarea poziției aparente a stelei pe firmament.) În 1919 astronomii britanici au organizat expediții pentru observarea eclipsei solare în două insule din Atlantic, una în nord-estul coastelor Braziliei și cealaltă în Golful Guinea. Ei au găsit că, în limitele erorilor experimentale, devierile razelor luminoase provenind de la câteva stele erau egale cu cele prezise de Einstein. Drept urmare, relativitatea generală a fost primită cu entuziasm în întreaga lume și a devenit pretutindeni subiect de conversație la recepții și dineuri.

Nu era deci evident că relativitatea generală înlocuise teoria newtoniană a gravitației? Relativitatea generală explicase o veche anomalie, precesia suplimentară a orbitei lui Mercur, și prezisese cu succes un nou și remarcabil fenomen, devierea luminii de către Soare. Ce mai trebuia făcut?

Anomalia orbitei lui Mercur și devierea luminii sunt o parte a poveștii, ba chiar una importantă. Dar, cum se întâmplă întotdeauna în istoria științei (și bănuiesc că în istoria oricărui domeniu), simplitatea poveștii dispare când privim lucrurile mai îndeaproape.

Să analizăm contradicția dintre teoria lui Newton și mișcarea observată a planetei Mercur. Chiar și fără relativitatea generală, nu e suficient de limpede că ceva era în neregulă cu teoria newtoniană? Nu neapărat. Orice teorie care, asemenea gravitației newtoniene, are un câmp de aplicații extrem de larg este întotdeauna pândită de anomalii experimentale. Nu există teorii

care să nu fie contrazise de unele experimente. Teoria newtoniană a sistemului solar a fost contrazisă mereu de-a lungul istoriei sale de diferite observații astronomice. Pe la 1916 aceste discrepanțe includeau nu numai anomalia orbitei lui Mercur, ci și anomalii în mișcarea cometelor Halley și Encke, precum și în mișcarea Lunii. Toate acestea prezentau un comportament care nu se potrivea cu teoria lui Newton. Acum știm că explicația acestor anomalii din mișcarea cometelor și a Lunii nu are nici o legătură cu fundamentele teoriei gravitației. Cometele Encke și Halley nu se comportă conform calculelor pornind de la teoria lui Newton deoarece în aceste calcule nu se știa cum să se introducă efectele presiunii exercitate de gazele eliberate de cometele aflate în mișcare de rotație atunci când acestea sunt încălzite la trecerea prin apropierea Soarelui. Și, în mod asemănător, mișcarea Lunii e foarte complicată fiindcă Luna e un corp destul de mare, și prin urmare e supusă unor forțe mareice complicate. Privind retrospectiv, nu e surprinzător că apăreau discrepanțe în aplicarea teoriei lui Newton la aceste fenomene. Au existat câteva sugestii pentru a explica anomalia mișcării lui Mercur în cadrul teoriei newtoniene. O posibilitate luată în serios la începutul acestui secol era că ar putea exista un fel de materie între Mercur și Soare care să provoace o ușoară perturbare a câmpului gravitațional solar. Nu există nimic în vreo contradicție dintre teorie și experiment care să se ridice în picioare, să fluture un steag și să strige: „Eu sunt o anomalie importantă!“ Nu exista nici o cale sigură prin care un om de știință care cerceta critic datele de la sfârșitul secolului XIX sau din primul deceniu al secolului XX să poată trage concluzia că era ceva important legat de aceste anomalii din sistemul solar. A fost nevoie de teorie pentru a lămuri care erau observațiile importante.

Odată ce Einstein a calculat în 1915 că din relativitatea generală rezultă o precesie suplimentară a orbitei lui Mercur egală cu valoarea observată de 43 de secunde pe secol, aceasta a devenit evident o dovadă importantă în favoarea teoriei sale. De fapt, după cum voi arăta mai târziu, trebuia să fie luată chiar mai în serios decât a fost. De vină a fost poate diversitatea altor posibile perturbații ale orbitei lui Mercur, prejudecata împotriva validării teoriilor prin date preexistente sau pur și simplu războiul – în orice caz, succesul lui Einstein

în explicarea precesiei lui Mercur nu a avut nici pe departe același impact cu raportul expediției care a observat eclipsa din 1919 și a verificat predicția lui Einstein privind devierea luminii de către Soare.

Să ne întoarcem deci la devierea luminii de către Soare. După 1919 astronomii au purces la verificarea predicției lui Einstein cu ocazia mai multor eclipse ulterioare. A fost o eclipsă în 1922 vizibilă în Australia, alta în 1929 în Sumatra, alta în 1936 în U.R.S.S. și alta în 1947 în Brazilia. Unele dintre observații păreau să conducă la rezultate privind devierea luminii în concordanță cu teoria lui Einstein, dar altele au obținut rezultate în grav dezacord cu predicțiile lui Einstein. Și, cu toate că expediția din 1919 a anunțat o marjă de eroare de 10% în devierea măsurată pe baza observării a douăsprezece stele și o concordanță cu teoria lui Einstein într-o marjă tot de aproximativ 10%, unele expediții ulterioare au găsit că nu pot obține aceeași precizie, deși au făcut observații asupra unui număr mult mai mare de stele. E drept că eclipsa din 1919 a fost deosebit de favorabilă acestui gen de observații, dar înclin să cred că astronomii acestei expediții s-au lăsat purtați de entuziasmul pentru teoria relativității în analiza datelor.

Într-adevăr, unii oameni de știință au avut rezerve la vremea respectivă cu privire la datele legate de eclipsa din 1919. Într-un raport adresat în 1921 comitetului Nobel, Svante Arrhenius a prezentat diferite critici privind rezultatele asupra devierii luminii. L-am cunoscut la Ierusalim pe venerabilul profesor Sambursky, care în 1919 fusese coleg cu Einstein la Berlin. Mi-a spus că astronomii și fizicienii din Berlin au privit cu scepticism faptul că astronomii britanici putuseră într-adevăr testa cu atâta precizie teoria lui Einstein.

Nu vreau să sugerez nici o clipă că în aceste observații s-ar fi strecurat vreo urmă de neonestitate. Vă puteți imagina tot felul de erori care afectează măsurarea devierii luminii de către Soare. Privești o stea care apare pe cer în apropierea discului solar când Soarele e acoperit de Lună. Compari poziția stelei pe niște plăci fotografice obținute la un interval de șase luni. Telescopul putea fi focalizat diferit în cele două observații. Placa fotografică însăși putea să se dilate sau să se contracte în acest interval. Și așa mai departe. La fel ca în orice experiment, sunt necesare tot felul de corecții. Astronomul face aceste corecții cât poate de bine. Dar, dacă

știi răspunsul, e normal să faci corecții după corecții până obții rezultatul „corect” și pe urmă să te oprești. Într-adevăr, astronomii expediției din 1919 au fost acuzați că au eliminat datele de pe una din plăcile fotografice care nu erau în acord cu predicțiile lui Einstein, fapt pus de ei pe seama unei modificări în focalizarea telescopului. Privind retrospectiv putem spune că astronomii britanici au avut dreptate, dar nu m-ar mira să aflu că au făcut corecții până când rezultatul lor s-a potrivit cu teoria lui Einstein.

E larg răspândită ideea că adevăratul test al unei teorii este compararea predicțiilor ei cu rezultatele experimentale. Dar, din perspectiva actuală, putem spune că explicarea din 1915 a anomaliilor orbitei lui Mercur măsurate anterior a fost un test mult mai solid pentru relativitatea generală decât verificarea calculelor lui Einstein legate de devierea luminii de către Soare prin observarea eclipsei din 1919 sau a eclipselor ulterioare. Altfel spus, în cazul relativității generale, o *retrodicție*, calculul anomaliilor deja cunoscute din mișcarea planetei Mercur, a oferit teoriei un test mai concludent decât o adevărată *predicție* a unui nou fenomen, devierea luminii în câmp gravitațional.

Cred că se pune accent pe rolul predicției în validarea teoriilor științifice fiindcă atitudinea clasică a celor interesați de știință este de a nu da credit teoreticienilor. Există temerea că teoreticianul își ajustează teoria pentru a fi în acord cu datele experimentale deja cunoscute, așa încât faptul că teoria se potrivește cu aceste date nu e un test serios pentru teorie.

Dar, chiar dacă Einstein aflase despre precesia suplimentară a orbitei lui Mercur încă din 1907, pentru cineva care știe cum a fost elaborată relativitatea generală, care urmărește cât de cât logica lui Einstein, e imposibil să-și închipuie că Einstein a elaborat teoria cu scopul de a explica această precesie. (Voi reveni imediat la șirul raționamentelor lui Einstein.) De multe ori o *predicție* reușită e cea pe care ar trebui s-o privim cu neîncredere. În cazul unei predicții valabile, cum a fost cea a lui Einstein privind devierea luminii de către Soare, e adevărat că teoreticianul nu cunoaște rezultatul experimental atunci când își elaborează teoria, dar pe de altă parte experimentatorul cunoaște rezultatul teoretic atunci când efectuează experimentul. Iar aceasta poate duce – și în cursul

istoriei chiar a dus – la tot atâtea erori ca și încrederea nejustificată în retrodicțiile reușite. Repet: asta nu înseamnă că experimentatorii își falsifică datele. Din câte știu, nu a existat niciodată vreun caz important de falsificare grosolană a datelor în fizică. Dar experimentatorii care cunosc rezultatul la care teoretic ar trebui să ajungă e firesc să caute erori de observație atunci când nu obțin acel rezultat sau să înceteze să mai caute erori atunci când îl obțin. E o dovadă de tărie de caracter din partea experimentatorilor faptul că nu ajung întotdeauna la rezultatele pe care le așteaptă.

Pentru a rezuma cele spuse până acum, am văzut că primele dovezi experimentale în favoarea relativității generale au constatat dintr-o singură retrodicție reușită privind anomalia orbitei lui Mercur, care probabil nu a primit atenția cuvenită, și din predicția unui nou fenomen, devierea luminii de către Soare, al cărei aparent succes a avut într-adevăr un impact uriaș, dar în realitate nu a fost atât de concludentă pe cât s-a presupus în general la acea vreme și a fost întâmpinată cu scepticism cel puțin de câțiva oameni de știință. Abia după al Doilea Război Mondial noile tehnici din domeniul radarului și radioastronomiei au dus la o îmbunătățire substanțială a preciziei testării experimentale a relativității generale. Putem spune acum că predicțiile relativității generale privind devierea (și întârzierea) luminii ce trece prin apropierea Soarelui și privind mișcarea orbitală nu numai a planetei Mercur, ci și a asteroidului Icarus și a altor corpuri naturale sau artificiale, au fost confirmate în limitele unor erori experimentale mai mici de 1%. Dar a trebuit să treacă mult timp.

Și totuși, în ciuda inconsistenței primelor dovezi experimentale în favoarea relativității generale, în anii '20 teoria lui Einstein a devenit teoria standard a gravitației predată în manualele de fizică și și-a păstrat acest statut până în zilele noastre, chiar dacă diferitele expediții pentru urmărirea eclipselor din anii '20 și '30 au prezentat dovezi în cel mai bun caz echivoce în favoarea teoriei. Îmi amintesc că, în anii '50, pe când învățam despre relativitatea generală, înainte ca radiolocația și radioastronomia să înceapă să aducă noi și solide dovezi în favoarea teoriei, consideram de la sine înțeles că relativitatea generală e în linii mari corectă. Poate că am fost cu toții pur și simplu creduli și am avut noroc, dar nu cred că aceasta e

adevărata explicație. Cred că acceptarea unanimă a relativității s-a datorat în mare parte forței de seducție a teoriei însăși – pe scurt, frumuseții ei.

În elaborarea relativității generale, Einstein urmasse un raționament care a putut fi urmărit de generațiile ulterioare de fizicieni ce s-au apucat să învețe teoria, iar raționamentul a exercitat asupra lor aceeași seducție pe care o simțise și Einstein. Totul a început în 1905, *annus mirabilis* pentru Einstein. În acel an, lucrând în paralel și la teoria cuantică a luminii, și la teoria mișcării particulelor mici în fluide, Einstein a elaborat o nouă perspectivă asupra spațiului și timpului, numită acum teoria relativității speciale. Această teorie era în concordanță cu teoria în vigoare asupra electricității și magnetismului, electrodinamica lui Maxwell. Un observator deplasându-se cu viteză constantă va observa că intervalele de spațiu și timp și câmpurile electromagnetice sunt modificate de mișcarea observatorului așa încât ecuațiile lui Maxwell să rămână valabile în ciuda mișcării (lucru deloc surprinzător, din moment ce relativitatea a fost anume concepută pentru a satisface această condiție). Dar relativitatea specială era ireconciliabilă cu teoria newtoniană a gravitației. De exemplu, în teoria lui Newton, forța gravitațională de atracție dintre Soare și o planetă depinde de distanța între pozițiile ocupate de cele două corpuri *în același timp*, dar în relativitatea specială simultaneitatea nu are o semnificație absolută – observatori diferiți, în funcție de starea lor de mișcare, nu vor cădea de acord dacă un eveniment are loc înaintea, după sau în același timp cu un alt eveniment.

Existau mai multe căi de a împăca teoria lui Newton cu relativitatea specială, iar Einstein a încercat cel puțin una dintre ele înainte să ajungă la relativitatea generală. Indiciul care i-a arătat lui Einstein în 1907 drumul spre relativitatea generală a fost o proprietate bine cunoscută și distinctivă a gravitației: forța gravitațională este proporțională cu masa corpului asupra căruia acționează. Einstein s-a gândit că aceasta seamănă cu așa-numitele forțe de inerție pe care le resimțim când ne mișcăm cu o viteză sau pe o direcție neuniforme. Forța de inerție este cea care împinge pasagerii în scaune atunci când un avion accelerează pe pista de decolare. Forța centrifugă care împiedică Pământul să cadă spre Soare este

de asemenea o forță de inerție. Toate aceste forțe de inerție sunt, la fel ca forțele gravitaționale, proporționale cu masa corpului asupra căruia acționează. Pe Pământ nu resimțim nici câmpul gravitațional al Soarelui, nici forța centrifugă provocată de mișcarea Pământului în jurul Soarelui, fiindcă cele două forțe se echilibrează reciproc, dar echilibrul ar fi rupt dacă una din forțe ar fi proporțională cu masa obiectelor asupra cărora acționează, iar cealaltă nu; în acest caz, unele obiecte ar putea cădea de pe Pământ pe Soare, iar altele ar putea fi azvârlite de pe Pământ în spațiul interstelar. În general, faptul că gravitația și forțele de inerție sunt ambele proporționale cu masa corpului asupra căruia acționează și nu depind de nici o altă proprietate a acestuia, face posibilă identificarea în orice punct dintr-un câmp gravitațional a unui „sistem de referință în cădere liberă“, în care nici gravitația, nici forțele inerțiale nu sunt resimțite deoarece ele se află într-un echilibru perfect pentru toate corpurile. Dacă resimțim forțele gravitaționale sau de inerție, aceasta se datorează faptului că nu ne aflăm într-un sistem în cădere liberă. De exemplu, la suprafața Pământului, corpurile în cădere liberă sunt accelerate spre centrul Pământului cu 32 de picioare (10 metri) pe secundă și resimțim forța gravitațională, cu excepția cazului în care se întâmplă să fim accelerați în jos în același ritm. Einstein a făcut un salt logic și a presupus că forțele gravitaționale și inerțiale sunt în esență unul și același lucru, fapt numit de el principiul echivalenței între gravitație și inerție, sau, pe scurt, principiul echivalenței. Conform acestui principiu, orice câmp gravitațional este complet descris atunci când cunoaștem sistemul de referință care se află în cădere liberă pentru fiecare punct din spațiu și timp.

După 1907, Einstein a căutat vreme de aproape un deceniu cadrul matematic potrivit pentru aceste idei. În cele din urmă a găsit exact ce-i trebuia printr-o analogie profundă între rolul gravitației în fizică și cel al curburii în geometrie. Faptul că forța gravitațională poate fi anulată pentru scurt timp într-o mică regiune din jurul oricărui punct al câmpului gravitațional dacă adoptăm un sistem de referință în cădere liberă potrivit seamănă bine cu o proprietate a suprafețelor curbe, aceea că, în ciuda curburii, putem face o hartă a suprafeței care să reprezinte corect distanțele și

direcțiile din imediata vecinătate a oricărui punct. Dacă suprafața este curbă, nici o hartă nu va arăta corect distanțele și direcțiile pretutindeni; orice hartă a unei regiuni mai vaste e un compromis, deformând într-un fel sau altul distanțele și direcțiile. Cunoscuta proiecție Mercator folosită la cartografierea suprafeței Pământului ne dă o idee corectă asupra distanțelor și direcțiilor din apropierea ecuatorului, dar produce distorsiuni teribile în apropierea polilor, Groenlanda apărând de câteva ori mai mare decât e în realitate. În mod asemănător, faptul că nu există *nici un* sistem de referință în cădere liberă în care efectele gravitaționale și inerțiale să se anuleze pretutindeni constituie o dovadă că ne aflăm într-un câmp gravitațional.

Pornind de la această analogie între gravitație și curbură, Einstein a ajuns la concluzia că gravitația nu e nici mai mult nici mai puțin decât un efect al curburii spațiului și timpului. Pentru a preciza această idee, el avea nevoie de o teorie matematică a spațiilor curbe care să depășească bine cunoscuta geometrie a suprafeței sferice bidimensionale a Pământului. Einstein a fost cel mai mare fizician care a apărut după Newton, stăpânea matematica pe care o cunoșteau cei mai mulți fizicieni din vremea lui, dar nu a fost un matematician. În cele din urmă a găsit exact ce îi trebuia în teoria spațiilor curbe elaborată de Riemann și alți matematicieni în secolul XIX. În forma sa finală, teoria relativității generale era doar o reinterpretare a matematicii deja existente a spațiilor curbe în termenii gravitației, împreună cu o *ecuație de câmp* care preciza curbura produsă de orice cantitate de materie și energie. Fapt remarcabil, pentru densitățile și vitezele mici din sistemul solar, relativitatea generală dădea exact aceleași rezultate ca teoria newtoniană a gravitației, deosebirea dintre cele două teorii putându-se face doar prin efecte minuscule cum sunt precesia orbitelor și devierea luminii.

Ar mai fi multe de spus despre frumusețea relativității generale. Deocamdată, sper că am spus destule pentru a vă face să simțiți ceva din forța de seducție a acestor idei. Cred că această frumusețe intrinsecă a fost cea care a alimentat credința fizicienilor în relativitatea generală de-a lungul deceniilor în care datele culese în expedițiile succesive pentru observarea eclipselor s-au dovedit atât de dezamăgitoare.

Această impresie e întărită dacă ne gândim la receptarea relativității generale în anii premergători expediției din 1919. Cel mai important a fost felul în care Einstein însuși privea relativitatea generală. Într-o carte poștală trimisă unui teoretician mai în vârstă, Arnold Sommerfeld, la data de 8 februarie 1916, cu trei ani înainte de expediție, Einstein spunea: „Veți fi convins de teoria relativității generale din clipa în care o veți studia. Nu am de gând să vin în apărarea ei nici măcar cu un singur cuvânt.” N-am cum să știu în ce măsură succesul calculului precesiei orbitei lui Mercur a contribuit la încrederea lui Einstein din 1916 în relativitatea generală, dar cu mult înainte, înainte și de a efectua calculul, ceva trebuie să-i fi dat suficientă încredere în ideile care stau la baza relativității generale pentru a-l determina să muncească la ea, iar acest lucru nu putea să fie decât însăși frumusețea ideilor.

Nu trebuie să subestimăm această încredere prezentă de la bun început. Istoria științei ne oferă nenumărate exemple de savanți care au avut idei bune, dar nu le-au urmat în acel moment, pentru ca peste ani să se demonstreze (adesea de către alții) că ideile duceau la progrese însemnate. O greșeală frecventă e să presupunem că oamenii de știință sunt obligatoriu apărători devotați ai propriilor idei. Deseori savantul care concepe primul o idee nouă o expune unei critici nefondate sau excesive fiindcă ar trebui să lucreze îndelung și din greu, iar în plus (încă mai important) să renunțe la alte cercetări, pentru a urmări cu seriozitate această idee.

Fizicienii *au fost* într-adevăr impresionați de relativitatea generală. Mai mulți savanți din Germania și din alte țări au aflat de relativitatea generală și au considerat-o promițătoare și importantă cu mult înainte de expediția din 1919. Printre ei se aflau nu numai Max Born și Sommerfeld din München, David Hilbert din Göttingen și Hendrik Lorentz din Leida, toți fiind în contact cu Einstein în timpul războiului, ci și Paul Langevin în Franța și Arthur Eddington în Anglia, care a inițiat expediția pentru observarea eclipsei din 1919. Nominalizările lui Einstein pentru premiul Nobel începând din 1916 sunt grăitoare. În 1916 Felix Ehrenhaft l-a nominalizat pentru teoria sa asupra mișcării browniene și pentru relativitatea restrânsă și generală. În 1917 A. Haas l-a nominalizat pentru relativitatea generală (luând în considerare calculul precesiei orbitei lui Mercur).

Tot în 1917, Emil Warburg l-a nominalizat pe Einstein pentru diverse contribuții, între care relativitatea generală. Mai multe nominalizări pe teme similare au fost primite în 1918. Apoi, în 1919, cu patru luni înainte de expediția pentru observarea eclipsei, Max Planck, unul dintre părinții fizicii moderne, l-a nominalizat pe Einstein pentru relativitatea generală și a afirmat că Einstein „a făcut primul pas dincolo de Newton“.

Nu aş vrea să se creadă că relativitatea generală a fost de la început acceptată fără rezerve și în unanimitate de comunitatea mondială a fizicienilor. De exemplu, raportul comisiei Nobel din 1919 sugera să se aștepte eclipsa din 29 mai înainte de a se lua o decizie asupra relativității generale și, chiar după 1919, când lui Einstein i s-a acordat în fine premiul Nobel în 1921, acesta nu a fost în mod explicit pentru relativitatea restrânsă și generală, ci „pentru contribuțiile sale în fizica teoretică, și în special pentru descoperirea legii efectului fotoelectric“.

Nu e atât de important momentul în care fizicienii au devenit în proporție de 75%, 90% sau 99% convinși de corectitudinea relativității generale. Importantă pentru progresul fizicii nu e decizia că o teorie e adevărată, ci decizia că merită să fie luată în serios – să fie predată studenților, să apară în manuale și mai ales să fie încorporată în cercetările oamenilor de știință. Din acest punct de vedere, cei mai importanți adepți ai relativității generale (după Einstein însuși) au fost astronomii britanici, care s-au convins nu de faptul că relativitatea generală era adevărată, ci că era îndeajuns de plauzibilă și de frumoasă pentru a merita să-i dedice o bună parte din propriile lor cercetări spre a-i verifica predicțiile, parcurgând mii de mile pentru a observa eclipsa din 1919. Dar chiar mai devreme, înainte ca relativitatea generală să devină o teorie bine încheată și înainte de calculul precesiei orbitei lui Mercur, frumusețea ideilor lui Einstein l-a făcut pe Erwin Freundlich de la Observatorul Regal din Berlin să organizeze o expediție finanțată de Krupp în Crimeea pentru a observa eclipsa din 1914. (Războiul l-a împiedicat să facă observații, iar, spre disperarea sa, Freundlich a fost arestat în Rusia pentru scurt timp.)

Primirea de care s-a bucurat relativitatea generală nu a depins numai de datele experimentale sau numai de calitățile intrinseci

ale teoriei, ci de împletirea teoriei cu experimentul. Am subliniat latura teoretică a acestei povești pentru a contrabalansa supralicitarea naivă a experimentului. Oamenii de știință și istoricii științei au abandonat de mult vechea perspectivă a lui Francis Bacon, după care ipotezele științifice trebuie elaborate prin observarea minuțioasă și lipsită de orice idei preconcepute a naturii. E limpede că Einstein nu a elaborat relativitatea generală prin examinarea îndelungată a datelor astronomice. Continuă să fie însă larg acceptat punctul de vedere al lui John Stuart Mill că numai prin observație ne putem *testa* teoriile. Dar, așa cum am văzut aici, în acceptarea relativității generale judecățile estetice și datele experimentale au fost indisolubil legate.

Într-un anume sens a existat de la bun început o mare cantitate de date experimentale în favoarea relativității generale – observațiile asupra mișcării Pământului în jurul Soarelui și a mișcării Lunii în jurul Pământului, precum și toate celelalte observații amănunțite asupra sistemului solar, de la Tycho Brahe sau chiar dinainte de el, care fuseseră deja explicate de teoria lui Newton. La prima vedere, ar putea părea o dovadă ciudată. Cităm ca dovadă a relativității generale nu doar o retrodicție, calculul mișcărilor planetare care fuseseră deja măsurate la momentul elaborării teoriei, dar vorbim acum despre observații astronomice care nu numai că fuseseră efectuate înainte ca Einstein să-și elaboreze teoria, ci fuseseră deja explicate de o altă teorie, cea a lui Newton. Cum ar putea fi considerată o predicție sau o retrodicție reușită a unor asemenea observații drept un triumf al relativității generale?

Pentru a înțelege asta trebuie să examinăm mai îndeaproape ambele teorii. Fizica newtoniană a explicat practic toate mișcările observate din sistemul solar, dar cu prețul introducerii unor presupuneri oarecum arbitrare. De pildă, să considerăm legea care spune că forța gravitațională produsă de un corp scade cu inversul pătratului distanței la acel corp. În teoria lui Newton, nimic nu impune cu necesitate legea inversului pătratului. Newton a ajuns la ideea legii inversului pătratului pentru a explica lucruri deja cunoscute despre sistemul solar, cum ar fi relația lui Kepler între dimensiunea orbitelor planetare și timpul în care planetele se rotesc în jurul Soarelui. În afara acestor fapte care țin de observație,

în teoria lui Newton se poate înlocui legea inversului pătratului cu o lege a inversului cubului sau a inversului puterii 2,01, fără nici cea mai mică modificare în cadrul conceptual al teoriei. Ar fi doar schimbarea unui detaliu minor al teoriei. Teoria lui Einstein era mult mai puțin arbitrară și mult mai rigidă. Pentru corpuri mișcându-se încet în câmpuri gravitaționale slabe, caz în care putem vorbi despre o forță gravitațională obișnuită, relativitatea generală *impune* ca forța să scadă conform legii inversului pătratului. În relativitatea generală e imposibil să ajustezi teoria așa încât să obții altceva decât legea inversului pătratului fără să violezi presupunerile care stau la baza teoriei.

De asemenea, după cum a subliniat Einstein în lucrările sale, faptul că forța gravitațională care acționează asupra unui obiect mic e proporțională cu masa obiectului, dar nu depinde de nici o altă proprietate a lui apare în mod arbitrar în teoria lui Newton. În teoria newtoniană, forța gravitațională ar fi putut să depindă, de exemplu, de dimensiunea, forma sau compoziția chimică a obiectului, fără să perturbe fundamentele conceptuale ale teoriei. În teoria lui Einstein, forța gravitațională exercitată asupra unui obiect *trebuie* să fie proporțională cu masa obiectului și în același timp să fie independentă de orice altă proprietate a lui*; dacă acest lucru nu ar fi adevărat, atunci forțele gravitaționale și inerțiale s-ar echilibra în moduri diferite pentru corpuri diferite, și nu am putea vorbi despre sisteme de referință în cădere liberă în care nici un corp să nu simtă efectele gravitației. Aceasta ar desființa interpretarea gravitației ca efect geometric al curbării spațiului-timp. Din nou, teoria lui Einstein avea o rigiditate care îi lipsea teoriei lui Newton, iar din acest motiv Einstein simțea că explicase mișcările obișnuite din sistemul solar într-un fel în care Newton nu o făcuse.

Din păcate, această idee de rigiditate a teoriilor fizice e foarte greu de definit riguros. Newton și Einstein cunoșteau amândoi

* Riguros vorbind, acest fapt e valabil doar în cazul obiectelor mici care se deplasează cu viteze reduse. Pentru un obiect care se deplasează rapid, forța gravitațională mai depinde și de impulsul obiectului. Din această cauză câmpul gravitațional al Soarelui poate să devieze razele luminoase, care nu au masă, dar au impuls. (N.a.)

trăsăturile generale ale mișcării planetare înainte de a-și formula teoriile, iar Einstein știa că trebuia să obțină o lege a forței gravitaționale de tipul inversului pătratului pentru ca teoria sa să reproducă succesele teoriei newtoniene. De asemenea, el știa că trebuia să obțină o forță gravitațională proporțională cu masa. Numai privind retrospectiv la întreaga teorie în forma ei finală putem spune că teoria lui Einstein explica legea inversului pătratului sau proporționalitatea forței gravitaționale cu masa, dar această judecată ține de gust și de intuiție – este exact judecata conform căreia, dacă teoria lui Einstein ar fi modificată pentru a permite o alternativă la legea inversului pătratului sau neproporționalitatea forței gravitaționale cu masa, rezultatul ar fi foarte urât. Avem deci din nou în minte judecățile noastre estetice și întreaga moștenire a teoriei atunci când analizăm implicațiile datelor.

Următoarea mea poveste se leagă de electrodinamica cuantică – teoria cuantică a electronilor și luminii. Este într-un fel imaginea în oglindă a primei povești. Timp de patruzeci de ani, relativitatea generală a fost larg acceptată ca teorie corectă a gravitației, în ciuda inconsistenței dovezilor în favoarea ei, datorită frumuseții sale irezistibile. Pe de altă parte, electrodinamica cuantică a fost susținută de la bun început de numeroase date experimentale, și totuși a fost privită cu neîncredere vreme de douăzeci de ani din cauza unei contradicții teoretice interne care părea că poate fi înlăturată numai pe căi inestetice.

Mecanica cuantică a fost aplicată câmpurilor electric și magnetic într-unul din primele articole despre mecanica cuantică, acea *Dreimännerarbeit* [lucrare cu trei autori] a lui Max Born, Werner Heisenberg și Pascual Jordan din 1926. Ei au calculat că energia și impulsul câmpurilor electric și magnetic dintr-o rază de lumină apar în pachete care se comportă la fel ca particulele, și astfel au justificat introducerea de către Einstein în 1905 a particulelor de lumină numite fotoni. Celălalt ingredient de bază al electrodinamicii cuantice a fost oferit de Paul Dirac în 1928. În forma sa inițială, teoria lui Dirac arăta cum pot fi descriși cuantic electronii prin funcții de undă compatibile cu teoria relativității speciale. Una dintre cele mai importante consecințe ale teoriei lui Dirac a fost

aceea că, pentru fiecare specie de particulă încărcată electric, cum e electronul, trebuie să existe o altă specie cu aceeași masă, dar cu sarcină electrică opusă, numită antiparticula sa. Antiparticula electronului a fost descoperită în 1932 și e cunoscută sub numele de pozitron. Electrodinamica cuantică a fost folosită la sfârșitul anilor '20 și începutul anilor '30 pentru a calcula o gamă largă de procese fizice (cum ar fi împrăștierea unui foton care ciocnește un electron, împrăștierea unui electron de către altul și anihilarea sau producerea unui electron și a unui pozitron) cu rezultate care în general concordau excelent cu experimentul.

Pe la mijlocul anilor '30 însă, părerea aproape unanimă era că electrodinamica cuantică nu trebuie considerată decât ca o aproximație, valabilă doar pentru reacții implicând fotoni, electroni și pozitroni la energie suficient de joasă. Problema nu era de genul celor care apar în cărțile de istoria științei adresate publicului larg, o neconcordanță între predicțiile teoretice și datele experimentale, ci o contradicție internă profundă în însăși teoria fizică. Era problema infiniților.

Problema a fost observată în diferite forme de Heisenberg, Pauli și fizicianul suedez Ivar Waller, dar a apărut cel mai pregnant și tulburător într-un articol din 1930 al tânărului fizician american Julius Robert Oppenheimer. Oppenheimer încerca să folosească electrodinamica cuantică pentru a calcula un efect subtil asupra energiilor atomilor. Un electron într-un atom poate emite o particulă de lumină, un foton, poate continua pentru un timp să se miște pe orbită, iar apoi poate reabsorbi fotonul, la fel cum un rugbist interceptează balonul de urmărire pe care l-a lansat. Fotonul nu ajunge să iasă din atom și își face cunoscută prezența doar indirect, prin efecte asupra proprietăților atomului cum sunt energia și câmpul său magnetic. (Asemenea fotoni sunt numiți *virtuali*.) Conform regulilor electrodinamicii cuantice, acest proces produce o deplasare a energiei stării atomice care poate fi calculată însumând un număr infinit de contribuții, câte o contribuție pentru fiecare valoare posibilă a energiei care poate fi atribuită fotonului virtual, energia fotonului nefiind limitată. Oppenheimer a găsit în calculul său că suma, deoarece include contribuții ale fotonilor

de energie nelimitată, este infinită, conducând la o deplasare infinită a energiei atomului.*

Energiile înalte corespund lungimilor de undă mici; deoarece lumina ultravioletă are lungimea de undă mai mică decât cea a luminii vizibile, acest infinit a devenit cunoscut sub numele de catastrofă ultravioletă.

În anii '30 și la începutul anilor '40 fizicienii credeau că apariția catastrofei ultraviolete în calculele lui Oppenheimer și în altele asemănătoare arăta că teoria existentă a electronilor și fotonilor pur și simplu nu era aplicabilă particulelor cu energii mai mari de câteva milioane de volți. Oppenheimer însuși era principalul promotor al acestei idei. Lucrul se explica în parte prin faptul că Oppenheimer se număra printre pionierii cercetărilor privind radiațiile cosmice, acele particule de energie înaltă care intră din spațiul cosmic în atmosfera terestră, iar studiile sale asupra interacției particulelor din razele cosmice cu atmosfera arătau că se petrec lucruri stranii cu particulele de energii înalte. Se petrecea într-adevăr ceva straniu, dar nu avea nici o legătură cu eșecul teoriei cuantice a electronilor și fotonilor; era doar semnul producerii unor particule de tip nou, cunoscute azi sub numele de miuoni. Dar chiar și după ce toate acestea au fost lămurite prin descoperirea miuonilor în 1937, a rămas general acceptată ideea că electrodinamica cuantică nu poate fi aplicată electronilor și fotonilor de energie înaltă.

Problema infinităților putea fi rezolvată făcând apel la forța brută, decretând pur și simplu că electronii pot emite sau absorbi numai fotoni cu energii mai mici decât o anumită valoare-limită. Toate succesele obținute în anii '30 de electrodinamica cuantică în explicarea interacțiilor electronilor și fotonilor implicau fotoni de energie joasă, deci aceste reușite puteau fi menținute presupunând că această valoare limită pentru energiile fotonilor era suficient de mare, de pildă 10 milioane de volți. Cu acest gen de limită pentru energiile fotonilor virtuali, electrodinamica cuantică ar fi prezis o foarte mică deplasare a energiilor atomilor. Nimeni la acea vreme

* Nu orice sumă a unui număr infinit de lucruri e infinită. De pildă, deși suma $1+1/2+1/3+1/4+\dots$ este infinită, suma $1+1/2+1/4+1/8+\dots$ are valoarea finită 2. (N.a.)

nu măsurase energiile atomilor cu suficientă precizie pentru a putea spune dacă exista într-adevăr această infimă deplasare, deci nu se punea problema unui dezacord cu experimentul. (De fapt, electrodinamica cuantică era privită cu atâta pesimism încât nimeni nu a încercat măcar să calculeze această deplasare a energiei.) Necazul cu această rezolvare a problemei înfiniților nu era că intra în conflict cu experimentul, ci că era prea arbitrară și inestetică.

În literatura de specialitate din anii '30 și '40 se găsesc o mulțime de alte soluții indigeste la problema înfiniților, ba chiar teorii în care infinitul provocat de emisia și reabsorbția fotonilor de energie înaltă era anulat de alte procese cu probabilitate negativă. Ideea de probabilitate negativă e evident un nonsens; introducerea sa în fizică dă măsura disperării la care se ajunsese în problema înfiniților.

În cele din urmă, rezolvarea problemei înfiniților a apărut la sfârșitul anilor '40 și a fost mult mai firească și mai puțin revoluționară. Celebrul eveniment s-a petrecut la începutul lunii iunie 1947, la o conferință ținută la Ram's Head Inn, în insula Shelter, lângă Long Island. Conferința fusese organizată pentru a reuni fizicienii care, după război, erau gata să reia în discuție problemele fundamentale din fizică. S-a dovedit a fi cea mai importantă conferință de fizică după Conferința Solvay de la Bruxelles, unde, cu cinsprezece ani în urmă, Einstein și Bohr dezbătuseră viitorul mecanicii cuantice.

Printre fizicienii aflați în insula Shelter se număra și Willis Lamb, un tânăr fizician de la Universitatea Columbia. Folosind unele tehnici din radiolocația cu microunde dezvoltată în timpul războiului, Lamb tocmai reușise să măsoare cu precizie acel tip de efect pe care Oppenheimer încercase să-l calculeze în 1930, o deplasare a energiei atomului de hidrogen datorată emisiei și reabsorbției fotonilor. Această deplasare este cunoscută de atunci sub numele de deplasare Lamb. Măsurarea în sine nu contribuise cu nimic la rezolvarea problemei înfiniților, dar i-a obligat pe fizicieni să-și pună din nou această problemă pentru a explica valoarea măsurată a deplasării Lamb. Soluția găsită de ei avea să influențeze hotărâtor cursul fizicii.

Câțiva dintre teoreticienii prezenți la conferință aflaseră deja despre rezultatele lui Lamb și veniseră la întrunire înarmați cu o

idee privind felul în care putea fi calculată deplasarea Lamb folosind principiile electrodinamicii cuantice, în ciuda problemei înfiniților. Ei s-au gândit că deplasarea energiei unui atom datorată emisiei și reabsorbției de fotoni nu e observabilă; observabilă e doar energia totală a atomului, care se calculează adunând această deplasare la energia calculată în 1928 de Dirac. Această energie totală depinde de *masa „goală”* și de *sarcina „goală”* a electronului, masa și sarcina care apar în ecuațiile teoriei înainte de a lua în considerare emisiile și reabsorbțiile fotonilor. Dar electronii liberi, la fel ca electronii din atomi, emit și reabsorb continuu fotoni care afectează masa și sarcina lor, astfel încât masa și sarcina goală nu sunt aceleași cu masa și sarcina măsurate ale electronului, care apar în tabelele particulelor elementare. De fapt, pentru a explica valorile observate (care desigur sunt finite) ale masei și sarcinii electronului, masa goală și sarcina goală trebuie să fie ele însele infinite. Energia totală a atomului este astfel suma a doi termeni, ambii înfiniți: energia „goală” care este infinită deoarece depinde de masa și sarcina goală, amândouă infinite, și deplasarea în energie calculată de Oppenheimer, la rândul ei infinită deoarece primește contribuții din partea fotonilor virtuali cu energie nelimitată. Se puna întrebarea: E posibil ca acești doi înfiniți să se anuleze și să rezulte o energie totală finită?

La prima vedere răspunsul părea să fie un nu descurajant. Dar Oppenheimer neglijase ceva când își efectuase calculul. Deplasarea în energie primește contribuții nu numai de la procesele în care un electron emite și apoi reabsoarbe un foton, ci și de la procesele în care un pozitron, un foton și un al doilea electron apar spontan în spațiul vid, fotonul fiind absorbit apoi în anihilarea pozitronului și a electronului inițial. De fapt acest bizar proces *trebuie* luat în calcul pentru ca răspunsul final privind energia atomului să depindă de viteza atomului în conformitate cu teoria relativității speciale. (Acesta e un exemplu al rezultatului găsit de Dirac cu mult înainte – o teorie cuantică a electronului e compatibilă cu teoria relativității speciale numai dacă include și pozitronul, antipartícula electronului.) Unul din teoreticienii prezenți pe insula Shelter era Victor Weisskopf, care calculase deja în 1936 deplasarea în energie rezultată din procesul pozitronic și găsisese că aproape anulează

infinitul obținut de Oppenheimer*. Nu era greu de ghicit că, dacă s-ar fi luat în considerare procesul pozitronic, *precum* și diferența dintre masa și sarcina goală a electronului și valorile lor observate, atunci înfiniții din deplasările în energie s-ar fi anulat reciproc.

Deși Oppenheimer și Weisskopf au fost prezenți la întrunirea de pe insula Shelter, teoreticianul care a calculat pentru prima dată deplasarea Lamb a fost Hans Bethe, deja cunoscut pentru contribuțiile sale în fizica nucleară, între care descrierea în 1930 a lanțului de reacții nucleare care fac ca stelele să strălucească. Pornind de la ideile dezbătute la conferință, în tren, pe drumul de întoarcere, Bethe a făcut un calcul aproximativ al deplasării în energie pe care Lamb o măsurase. Încă nu dispunea de tehnici cu adevărat eficiente pentru a include pozitronii și alte efecte ale relativității speciale, iar calculul său din tren urma îndeaproape încercările lui Oppenheimer din urmă cu șaptesprezece ani. Diferența era că, atunci când Bethe întâlnea un infinit, neglija contribuțiile la deplasarea în energie provenind de la emisia și absorbția fotonilor de energie înaltă (oarecum arbitrar, Bethe a considerat ca limită pentru energiile fotonului energia masei electronului), iar astfel a obținut un rezultat finit, în bun acord cu măsurătorile lui Lamb. Era aproape calculul pe care Oppenheimer l-ar fi putut face în 1930, dar a fost nevoie de urgența explicării unui experiment și de încurajarea ideilor vehiculate pe insula Shelter pentru ca cineva să ducă la bun sfârșit acest calcul.

În scurt timp fizicienii au efectuat calcule și mai exacte ale deplasării Lamb, care țineau cont de pozitroni și de alte efecte relativiste. Important nu era atât că se obțineau rezultate mai precise, ci că problema înfiniților fusese controlată; s-a dovedit că înfiniții se anulau fără a trebui să fie eliminate în mod arbitrar contribuțiile fotonilor virtuali de energie înaltă.

După cum spunea Nietzsche, „tot ce nu ne ucide ne întărește“. Electrodinamica cuantică fusese aproape distrusă de problema

* Mai exact, includerea procesului pozitronic făcea ca suma energiilor să se comporte asemenea seriei $1+1/2+1/3+\dots$, și nu ca seria $1+2+3+4+\dots$. Ambele sume sunt infinite, dar una este mai puțin infinită decât cealaltă, în sensul că e mai ușor de închipuit ce trebuie făcut cu ea. (N.a.)

infiniților, dar a fost salvată de ideea anulării infinitelor printr-o redefinire sau *renormare* a masei și sarcinii electronului. Dar, pentru ca problema infinitelor să poată fi rezolvată în acest fel, trebuie ca infinitii să apară în calcule numai în anumite condiții foarte restrictive, ceea ce se întâmplă doar în cazul unei clase restrânse de teorii cuantice de câmp simple. Asemenea teorii se numesc *renormabile*. Cea mai simplă versiune a electrodinamicii cuantice e renormabilă în acest sens, dar orice mică modificare în această teorie i-ar anula această proprietate și ar conduce la o teorie cu infiniti care nu pot dispărea printr-o redefinire a constantelor teoriei. Această teorie nu era deci doar matematic satisfăcătoare și în acord cu experimentul, dar părea să conțină în ea însăși o explicație pentru faptul că era așa cum era; orice mică modificare în teorie ar conduce nu numai la un dezacord cu experimentul, ci și la rezultate total absurde – răspunsuri infinite la întrebări perfect rezonabile.

Calcululele deplasării Lamb din 1948 erau încă teribil de complicate deoarece, deși includeau acum pozitronii, reprezentau deplasarea Lamb ca pe o sumă de termeni care individual violau teoria relativității speciale, iar abia răspunsul final era în acord cu această teorie. Între timp, Richard Feynman, Julian Schwinger și Sinitiro Tomonaga au elaborat independent metode mult mai simple de calcul, compatibile cu teoria relativității în fiecare etapă a lor. Ei au folosit aceste tehnici la alte calcule, unele dintre ele într-un acord spectaculos cu experimentul. De exemplu, electronul are un câmp magnetic foarte slab, calculat prima oară în 1928 de către Dirac pe baza teoriei cuantice relativiste a electronului. Imediat după conferința din insula Shelter, Schwinger a publicat rezultatele unui calcul aproximativ al deplasării intensității câmpului magnetic al electronului provocate de procese în care sunt emiși și reabsorbiți fotoni virtuali. De atunci acest calcul a fost continuu îmbunătățit, rezultatul actual fiind o creștere a câmpului magnetic al electronului, datorată emisiilor și reabsorbțiilor de fotoni și altor fenomene similare, cu un factor de 1,00115965214 (cu o eroare de aproximativ 3 unități la ultima cifră) față de vechea predicție a lui Dirac, în care aceste emisii și reabsorbții fuseseră ignorate. Pe când Schwinger făcea acest calcul, experimentele lui

I.I. Rabi și ale colaboratorilor săi de la Columbia arătau că într-adevăr câmpul magnetic al electronului este puțin mai mare decât vechea valoare a lui Dirac, și anume cu aproximativ cantitatea calculată de Schwinger. Un rezultat experimental recent dă pentru acest factor valoarea 1,001159652188, cu o marjă de eroare de circa 4 unități pentru ultima cifră. Acordul numeric între teorie și experiment în acest caz este probabil cel mai impresionant din întreaga știință.

După asemenea succese, nu e surprinzător că electrodinamica cuantică, în versiunea sa renormabilă simplă, a fost general acceptată drept teoria corectă a fotonilor și electronilor. Dar, în ciuda succeselor experimentale ale teoriei și cu toate că infiniții din această teorie se anulează cu toții atunci când se operează corect cu ei, faptul în sine că infiniții apar continuă să producă murmure de nemulțumire față de electrodinamica cuantică și alte teorii similare. În special Dirac spunea mereu despre renormare că e un fel de a ascunde infiniții sub preș. Nu am fost de acord cu Dirac și m-am contrazis cu el pe această temă la conferințele de la Coral Gables și Lacul Konstanz. A ține cont de diferența dintre masa și sarcina goală a electronului și valorile lor măsurate nu e un simplu truc născocit pentru a scăpa de acești infiniți, ci un lucru pe care ar trebui să-l facem chiar dacă totul ar fi finit. Procedul nu conține nimic arbitrar sau ad-hoc; trebuie pur și simplu să identificăm corect ce anume măsurăm de fapt în experimentele de laborator când determinăm masa și sarcina electronului. Nu mi s-a părut că e înspăimântător un infinit în masa și sarcina goală, câtă vreme răspunsurile finale pentru cantitățile fizice se dovedesc a fi finite, neambigue și în acord cu experimentul. Mi s-a părut că o teorie cu un succes atât de spectaculos cum e electrodinamica cuantică trebuie să fie mai mult sau mai puțin corectă, deși s-ar putea să nu fie formulată în modul cel mai potrivit. Pe Dirac nu l-au impresionat aceste argumente. Nu sunt de acord cu atitudinea lui privind electrodinamica cuantică, dar nu cred că era vorba doar de încăpățănare; cerința ca teoria să fie complet finită e asemănătoare cu o mulțime de alte judecăți estetice pe care fizicienii teoreticieni simt mereu nevoia să le facă.

Cea de-a treia poveste a mea se leagă de elaborarea și acceptarea în cele din urmă a teoriei forței nucleare slabe. Această forță nu e atât de importantă în viața de toate zilele cum sunt forțele electrică, magnetică sau gravitațională, dar joacă un rol esențial în reacțiile nucleare care generează energie și produc diferite elemente chimice în interiorul stelelor.

Forța nucleară slabă și-a făcut pentru prima dată simțită prezența când, în 1896, Henri Becquerel a descoperit radioactivitatea. În anii '30 a devenit limpede că în tipul de radioactivitate descoperit de Becquerel, cunoscut sub numele de dezintegrare beta, forța nucleară slabă face ca un neutron din nucleu să se transforme în proton, în același timp apărând un electron și o altă particulă, numită azi antineutrîn, care sunt expulzate din nucleu. Acest lucru nu e permis nici unui alt tip de forță. Forța nucleară tare, care menține protonii și neutronii uniți în nucleu, și forța electromagnetică, al cărei efect e respingerea dintre protoni, nu pot schimba identitatea acestor particule, iar forța gravitațională evident nu poate avea un asemenea efect, așa încât observarea neutronilor care se transformă în protoni sau a protonilor care se transformă în neutroni a adus dovada existenței unui nou tip de forță în natură. După cum îi arată și numele, forța nucleară slabă e mai slabă decât forța electromagnetică sau decât forța nucleară tare. Acest lucru e demonstrat spre exemplu de faptul că dezintegrarea beta e atât de lentă; cele mai rapide dezintegrări beta durează în medie aproximativ o sutime de secundă, incomparabil mai mult decât durată tipică a proceselor provocate de forța nucleară tare, care e de o milionime de milionime de milionime de milionime de secundă.

În 1933 Enrico Fermi a făcut primul pas semnificativ către o teorie a acestui nou tip de forță. În teoria sa, forța nucleară slabă nu acționează la distanță ca forțele gravitațională, electrică sau magnetică; ea transformă un neutron într-un proton și creează instantaneu un electron și un antineutrîn, totul în același punct din spațiu. A urmat un sfert de secol de eforturi experimentale cu scopul de a lămuri problemele lăsate în suspensie de teoria lui Fermi. Între acestea, un loc aparte îl avea cea legată de felul în care forța slabă depinde de orientarea relativă a spinilor particulelor implicate. În

1957 problema a fost lămurită, iar teoria lui Fermi asupra forței nucleare slabe a căpătat forma finală.

După această descoperire din 1957 s-ar fi putut crede că nu existau anomalii în înțelegerea forței nucleare slabe. Dar, deși aveam o teorie care putea explica tot ce era cunoscut experimental despre forța slabă, în general fizicienii nu erau mulțumiți de teorie, iar mulți dintre noi am muncit din greu încercând să limpezim teoria și s-o facem să capete sens.

Ce nu era în regulă cu teoria lui Fermi nu ținea de latura experimentală, ci de cea teoretică. În primul rând, deși funcționa bine pentru dezintegrarea beta, când teoria era aplicată unor procese mai exotice dădea rezultate absurde. Teoreticienii puneau întrebări perfect rezonabile, de pildă care e probabilitatea împrăstierii unui neutrino pe un antineutrino cu care se ciocnește, iar când făceau calculele (luând în considerare emisia și reabsorbția unui neutron și a unui antiproton) răspunsul era infinit. Evident, asemenea experimente nu au fost efectuate, dar calculele dădeau rezultate care nu puteau fi în acord cu nici un rezultat experimental. După cum am văzut, cu asemenea infiniți se mai confruntaseră în teoria forțelor electromagnetice Oppenheimer și alții la începutul anilor '30, dar pe la sfârșitul anilor '40 teoreticienii descoperiseră că toți acești infiniți din electrodinamica cuantică se anulează dacă masa și sarcina electrică a electronului sunt definite corespunzător, sau „renormate“. Pe măsură ce se aflau mai multe lucruri despre forța slabă, devenea tot mai limpede că infiniții din teoria lui Fermi nu se puteau anula în modul acesta; teoria nu era renormabilă.

Alt lucru în neregulă cu teoria forțelor slabe era că avea un mare număr de elemente arbitrare. Forma de bază a forței slabe fusese dedusă în mod mai mult sau mai puțin direct din experiment și ar fi putut fi mult diferită fără să violeze vreun principiu fizic cunoscut.

Am lucrat la teoria forțelor slabe încă din facultate, dar în 1967 lucram în domeniul forțelor nucleare tari, forțele care mențin neutronii și protonii în interiorul nucleului atomic. Încercam să construiesc o teorie a forțelor tari pornind de la o analogie cu electrodinamica cuantică. M-am gândit că diferența dintre forțele nucleare tari și electromagnetism s-ar putea explica printr-un fenomen numit *ruperea simetriei*, pe care îl voi explica mai târziu.

Dar nu a mers. M-am pomenit elaborând o teorie care nu semăna deloc cu forțele tari așa cum ne erau ele cunoscute pe cale experimentală. Apoi am înțeles brusc că aceste idei, deși se dovediseră complet nefolositoare în privința forțelor tari, ofereau o bază matematică pentru o teorie a forțelor nucleare slabe care ar fi putut răspunde oricăror exigențe. Am întrevăzut posibilitatea unei teorii a forțelor slabe analoagă electrodinamicii cuantice. La fel cum forța electromagnetică între două particule încărcate electric e produsă de schimbul de fotoni, forța slabă nu ar acționa instantaneu într-un singur punct din spațiu (ca în teoria lui Fermi), ci ar fi produsă de schimbul unor particule de genul fotonilor între particule aflate în poziții diferite. Aceste noi particule de tipul fotonilor nu puteau avea masă nulă ca fotonii (dacă ar fi avut masă nulă, ar fi fost demult descoperite), dar au fost introduse în teorie într-un mod atât de asemănător celui în care fotonii apar în electrodinamica cuantică, încât m-am gândit că teoria ar putea fi renormabilă în același sens ca electrodinamica cuantică – adică, înfiniții din teorie s-ar putea anula prin redefinirea maselor și a altor cantități din teorie. Mai mult, principiile de bază ar impune constrângeri asupra teoriei, ceea ce ar elimina o mare parte din arbitrarul teoriilor precedente.

Am obținut o formă concretă particulară a acestei teorii, adică un set particular de ecuații care guvernează interacțiile dintre particule și care, în limita energiilor joase, sunt approximate de teoria lui Fermi. Rezultatul la care am ajuns, deși nu pornisem cu această idee, a fost nu doar o teorie a forțelor slabe bazată pe analogia cu electromagnetismul; s-a dovedit a fi o teorie unificată a forțelor slabe și electromagnetice care arăta că ele nu erau decât aspecte diferite a ceea ce avea să fie mai târziu numit forță *electroslabă*. Fotonul, particula fundamentală ale cărei emisii și absorbții generează forțele electromagnetice, a fost alăturat unei familii strâns unite de particule asemănătoare lui, prezise de teorie: particulele *W* încărcate electric, al căror schimb generează forța slabă din radioactivitatea beta, și o particulă neutră pe care am botezat-o „*Z*“, despre care voi vorbi mai târziu. (Particulele *W* apăruseră demult în speculațiile asupra forțelor slabe; *W* vine de la „weak“ [slab]. Am ales litera *Z* pentru noua lor rudă deoarece particula

are sarcina electrică zero și de asemenea pentru că Z e ultima literă a alfabetului, iar eu speram că acesta va fi ultimul membru al familiei.) În esență aceeași teorie a fost elaborată independent în 1968 de fizicianul pakistanez Abdus Salam, care lucra la Trieste. Aspecte ale acestei teorii fuseseră anticipate în lucrările lui Salam și John Ward, și chiar mai devreme de colegul meu din liceu și de la Universitatea Cornell, Sheldon Glashow.

Această unificare a forțelor slabe și electromagnetice s-a dovedit până în prezent corectă. Vrem întotdeauna să explicăm tot mai multe lucruri făcând apel la tot mai puține idei, deși când am pornit nu știam încotro mă îndreptam. Dar în 1967 această teorie nu furniza absolut nici o explicație a vreunei anomalii experimentale din fizica forțelor slabe. Teoria nu explica nici o informație experimentală existentă care să nu fi fost lămurită anterior de teoria lui Fermi. De asemenea, noii teorii electrolabe nu i s-a acordat la început aproape nici o atenție. Dar nu cred că teoria nu a captat interesul celorlalți fizicieni doar fiindcă nu era susținută de date experimentale. La fel de importantă era problema pur teoretică legată de coerența ei internă.

Atât Salam, cât și eu am susținut că această teorie elimina problema infinitilor în cazul forțelor slabe. Dar nu am putut s-o demonstrăm. În 1971 am primit preprintul unui articol scris de un tânăr absolvent al Universității din Utrecht pe nume Gerard 't Hooft, în care acesta pretindea că a demonstrat că teoria rezolvase problema infinitilor: infinitii din calculele cantităților observabile se anulau cu toții, la fel ca în electrodinamica cuantică.

La început nu am fost convinși de articolul lui 't Hooft. Nu auzisem până atunci de el, iar articolul folosea o metodă matematică elaborată de Feynmann în care nu avusesem încredere anterior. Ceva mai târziu am auzit că teoreticianul Ben Lee adoptase ideile lui 't Hooft și încerca să obțină aceleași rezultate folosind metode matematice mai convenționale. Îl cunoșteam pe Ben Lee și îi purtam un mare respect – dacă el luase lucrarea lui 't Hooft în serios, și eu trebuia să fac la fel. (Ben a devenit mai târziu cel mai bun prieten și colaborator al meu în fizică. A murit într-un tragic accident de automobil în 1977). Am privit mai atent ce făcuse

't Hooft și am văzut că găsise într-adevăr cheia pentru a demonstra că înfiniții se anulează.

După articolul lui 't Hooft, deși încă nu exista nici cea mai mică dovadă experimentală în sprijinul acestei teorii, ea a început să-i intereseze pe fizicieni. Acesta e un caz în care se poate evalua destul de precis nivelul de interes față de o teorie științifică, deoarece întâmplarea a făcut ca Institutul pentru Informare Științifică (ISI) să publice un raport asupra numărului de citări ale primului meu articol despre teoria electrolabă ca exemplu privind utilitatea analizei citărilor pentru înțelegerea istoriei științei. Articolul a fost scris în 1967. În 1967, zero citări. În 1968 și 1969, din nou zero citări. (În această perioadă Salam și cu mine încercam să demonstrăm ceea ce până la urmă a demonstrat 't Hooft, și anume că teoria nu conținea înfiniți.) În 1970 a fost citat o dată. (Nu știu cine a fost.) În 1971, anul articolului lui 't Hooft, articolul meu din 1967 a fost citat de trei ori, o dată de către 't Hooft. În 1972, tot fără să fi primit vreun nou sprijin experimental, a fost brusc citat de 65 de ori. În 1973 a fost citat de 165 de ori, iar numărul citărilor a crescut treptat până în 1980, când articolul a fost citat de 330 de ori. Un studiu recent al ISI a arătat că acest articol a fost cel mai frecvent citat articol din domeniul fizicii particulelor elementare în ultima jumătate de secol.

Interesul fizicienilor în legătură cu această teorie a fost deci stârnit de rezolvarea unei probleme conceptuale interne din fizica particulelor, problema înfiniților pentru forțele nucleare slabe. În 1971 și 1972 încă nu exista nici cea mai mică dovadă experimentală că această teorie era mai bună decât vechea teorie a lui Fermi.

Apoi dovezile experimentale au început să apară. Schimbul de particule Z conducea la un nou tip de forță nucleară slabă cunoscut sub numele de *curent neutru slab*, care poate fi pus în evidență la împrăștierea fasciculelor de neutrini pe nucleele obișnuite. (Termenul de „curent neutru” este folosit deoarece aceste procese nu implică schimburi de sarcină electrică între nuclee și alte particule.) Experimente pentru detectarea acestui tip de împrăștiere a neutrinilor au fost plănuite la CERN (acronimul care a înlocuit numele inițial, Centre Européen de Recherches Nucléaires – Centrul European pentru Cercetări Nucleare, al laboratorului

paneuropean de la Geneva) și la Fermilab (lângă Chicago). Au fost necesare demersuri considerabile. Fiecare experiment implica serviciile a treizeci până la patruzeci de fizicieni. Nu e ușor de realizat acest gen de experiment dacă nu știi exact ce vrei să obții. Descoperirea curenților neutri slabi a fost anunțată prima dată în 1973 la CERN, iar după unele ezitări și la Fermilab. După 1974, când atât Fermilab, cât și CERN căzuseră de acord asupra existenței curenților neutri, lumea științifică a fost în general convinsă că teoria electrolabă e corectă. Ziarul din Stockholm *Dagens Nyheder* s-a grăbit chiar să anunțe în 1975 că Salam și cu mine urma să primim Premiul Nobel pentru fizică în acel an. (Ceea ce nu s-a întâmplat.)

Ne-am putea întreba de ce acceptarea validității teoriei electrolabe a fost atât de rapidă. Desigur, curenții neutri fuseseră preziși și au fost apoi descoperiți. Oare nu în felul acesta se impune orice teorie? Nu cred însă că putem privi lucrurile atât de simplist.

În primul rând, curenții neutri nu constituiau ceva nou în speculațiile privind forțele slabe. Mai demult am găsit prima mențiune a teoriei curenților neutri în 1937, într-un articol al lui George Gamow și Edward Teller, în care existența curenților neutri slabi era prezisă pe baze destul de plauzibile. Au existat chiar dovezi experimentale în favoarea curenților neutri în anii '60, dar nimeni n-a crezut în ele; experimentatorii care au găsit aceste dovezi privind forțele slabe au considerat că sunt erori. În 1973, un nou element important pentru experimentatori a fost predicția asupra intervalului în care trebuia căutată tăria forțelor curențului neutru. De exemplu, într-un anumit tip de reacție neutrinică acestea produc efecte având o intensitate de 15% până la 25% din cea a forțelor slabe obișnuite. Această predicție a dat informații privind acuratețea de care era nevoie pentru a fi găsite experimental aceste forțe. Dar lucrul esențial care s-a petrecut în 1973 a fost că apăruse o teorie având acele calități – coerență internă și rigiditate – care i-au îndemnat pe fizicieni să creadă că vor progresa mai mult în domeniile lor dacă o acceptă decât dacă așteaptă să fie infirmată.

Într-un anume sens, teoria electrolabă s-a bucurat de sprijin experimental încă înainte de descoperirea curenților neutri, deoarece făcuse o „retrodicție“ corectă a tuturor proprietăților forțelor slabe care fuseseră explicate anterior de teoria lui Fermi, precum

și a tuturor proprietăților forțelor electromagnetice care fuseseră descrise de electrodinamica cuantică. La fel ca în cazul relativității generale, se poate pune întrebarea de ce o retrodicție trebuie socotită un succes dacă ceea ce ea explică a fost deja explicat de o teorie anterioară? Teoria lui Fermi explicase proprietățile forțelor slabe invocând un număr de elemente arbitrare, arbitrare în același sens în care era arbitrară și legea inversului pătratului din teoria newtoniană a gravitației. Teoria electroslabă explica aceste elemente (cum ar fi dependența forței slabe de spinii particulelor implicate) într-un mod convingător. Dar asemenea judecăți scapă unei analize riguroase; ele țin de gust și de experiență.

Brusc, în 1976, la trei ani de la descoperirea curenților neutri, s-a declanșat o criză. Nu mai exista nici o îndoială în privința existenței curenților neutri, dar experimente din 1976 indicau că aceste forțe nu prezintă unele din proprietățile prezise de teorie. Anomalia a apărut în experimente efectuate la Seattle și la Oxford asupra propagării luminii polarizate prin vapori de bismut. Se știa încă din lucrările lui Jean-Baptiste Biot din 1815 că lumina polarizată, când străbate soluțiile anumitor zaharuri, suferă o rotație a planurilor de polarizare spre dreapta sau spre stânga. De exemplu, polarizarea luminii se rotește spre dreapta când trece prin soluții ale dextrozei zaharoase obișnuite și spre stânga când trece prin soluții de levuloză. Asta se întâmplă deoarece o moleculă de dextroză nu e la fel cu imaginea ei în oglindă, molecula de levuloză, așa cum o mânășă pentru mâna stângă e diferită de o mânășă pentru mâna dreaptă (spre deosebire de o pălărie sau o cravată, care arată la fel indiferent dacă sunt privite direct sau în oglindă). În mod normal, nu era de așteptat acest tip de rotație pentru lumina polarizată care trece printr-un gaz alcătuit din atomi nelegați în molecule, cum sunt cei de bismut. Dar teoria electroslabă prezicea o asimetrie între stânga și dreapta a forțelor nucleare slabe dintre electroni și nuclee atomice, provocată de schimbul de particule Z , care dă unor asemenea atomi un fel de „specificitate“, ca în cazul mânășii sau a moleculei de zahăr. (Efectul era de așteptat să fie deosebit de pronunțat pentru bismut din cauza unei particularități a nivelelor sale de energie atomică.) Calculele arătau că asimetria între stânga și dreapta la atomul de bismut trebuia să producă o

ușoară rotație spre stânga a polarizării luminii ce trece prin vaporii de bismut. Spre surprinderea lor, experimentatorii de la Oxford și Seattle nu au putut observa nici o rotație și au anunțat că, dacă o asemenea rotație există, ea trebuie să fie mult mai mică decât valoarea prezisă.

A fost o adevărată bombă. Experimentele păreau să indice că acea teorie elaborată independent de Salam și de mine în anii 1967–1968 nu putea fi corectă în detaliile ei. Nu eram însă pregătit să abandonez ideile generale ale teoriei electrolabe. Da la articolul lui 't Hooft din 1971 mă convinsesem că în linii mari teoria era corectă, dar consideram versiunea ei particulară concepută de Salam și de mine doar ca pe cea mai simplă posibilitate a ei. De exemplu, puteau exista și alți membri ai familiei formate din foton și particulele W și Z sau alte particule înrudite cu electronul și neutrinel. Pierre Duhem și W. Van Quine au arătat cu mult timp în urmă că o teorie științifică nu poate fi niciodată complet invalidată de datele experimentale, fiindcă există mereu un mod de a manipula teoria sau presupunerile ei auxiliare așa încât să se ajungă la un acord între teorie și experiment. La un moment dat trebuie pur și simplu să te hotărăști dacă modificările necesare pentru a evita contradicția cu experimentul sunt prea inestetice pentru a fi demne de încredere.

Într-adevăr, după experimentele de la Oxford și Seattle mulți dintre teoreticieni au început să caute o mică modificare a teoriei electrolabe care să explice de ce forțele curenților neutri nu prezentau așteptata asimetrie între stânga și dreapta. Mai întâi ne-am gândit că am putea pierde puțin din frumusețea teoriei pentru a o pune în acord cu toate datele. Îmi amintesc că la un moment dat Ben Lee a venit la Palo Alto, unde mă aflam în acel an, și că am renunțat la o excursie îndelung plănuită la Yosemite pentru a lucra împreună cu el, în încercarea de a modifica teoria electrolabă pentru a o pune în acord cu cele mai recente date (între care și indicii false privind alte discrepante legate de reacțiile neutrinilor de energie înaltă). Dar nimic nu părea să meargă.

Una dintre probleme era că experimentatorii de la CERN și Fermilab ne furnizaseră deja o mulțime de date privind împrăștierea neutrinilor în ciocnirile cu protonii și neutronii, aproape toate

părând să fie în acord cu versiunea inițială a teoriei electrolabe. Era greu de înțeles cum s-ar fi putut ca o altă teorie să aibă același succes în această privință, și în același timp să concorde în mod natural cu rezultatele experimentelor cu atomii de bismut – adică fără să fim obligați să introducem multe complicații atent ajustate pentru a obține acordul cu datele. Întors la Harvard, am găsit, ceva mai târziu, împreună cu Howard Georgi un argument de ordin general care afirma că nu exista nici o cale naturală de a pune teoria electrolabă în acord cu datele de la Oxford și Seattle, precum și cu date mai vechi privind reacțiile neutrinice. Aceasta nu i-a împiedicat desigur pe unii teoreticieni să construiască teorii cât se poate de nefirești (activitate care ajunsese să fie numită la Boston „comiterea unui act nefiresc”), conform celei mai vechi reguli a progresului științific după care e mai bine să faci ceva decât să nu faci nimic.

Apoi, în 1978, un nou experiment de la Stanford a măsurat forța slabă dintre electroni și nuclee atomice într-un mod complet diferit, nu prin folosirea electronilor din atomii de bismut, ci prin împrăștierea unui fascicul de electroni din acceleratorul de la Stanford pe nuclee de deuteriu. (Nu era nimic special în alegerea deuteriului; era doar o sursă convenabilă de protoni și neutroni.) Acum experimentatorii au găsit așteptata asimetrie între stânga și dreapta. În acest experiment, asimetria a fost pusă în evidență prin diferența dintre rata de împrăștiere a electronilor cu rotație (spin) spre stânga față de cei cu rotație spre dreapta. (Spunem că o particulă în mișcare se rotește spre dreapta sau spre stânga dacă degetele mâinii drepte sau stângi indică sensul de rotație atunci când degetul mare e îndreptat în direcția mișcării.) Diferența dintre ratele de împrăștiere a fost de aproximativ unu la zece mii, exact valoarea prezisă de teorie.

Brusc, fizicienii din întreaga lume au ajuns la concluzia că versiunea inițială a teoriei electrolabe era în cele din urmă corectă. Observați însă că existau în continuare două experimente care contraziceau predicțiile teoriei privind forța slabă a curentului neutru dintre electroni și nuclee, și doar un experiment care le confirma, iar asta într-un context foarte diferit. De ce oare imediat ce s-a ivit un experiment care susținea teoria electrolabă fizicienii au căzut de acord că teoria trebuia într-adevăr să fie corectă? Unul dintre motive a fost cu siguranță acela că ne-am simțit cu toții

ușurați să aflăm că nu mai trebuia să avem de-a face cu vreo variantă nenaturală a teoriei electrolabe inițiale. Criteriul estetic al naturaleții i-a ajutat pe fizicieni să cântărească mai bine datele experimentale contradictorii.

Teoria electrolabă a continuat să fie testată experimental. Experimentul de la Stanford nu a fost repetat, dar câteva grupuri de fizicieni atomiști au continuat să caute asimetrii stânga-dreapta nu numai la bismut, dar și la alți atomi, cum sunt cei de thaliu sau de cesiu. (Chiar înainte de experimentul de la Stanford, un grup din Novosibirsk anunțase că a observat așteptata asimetrie la bismut, anunț care nu prea fusese luat în seamă înainte de rezultatele de la Stanford, în parte deoarece fizica experimentală sovietică nu se bucura de credit în Occident.) S-au făcut noi experimente la Berkeley și la Paris, iar fizicienii de la Oxford și Seattle și-au repetat experimentele. Experimentatorii și teoreticienii sunt acum de acord că asimetria stânga-dreapta e reală și are, cu bună aproximație, valoarea prezisă de teorie, atât la atomi, cât și la împrăștierea electronilor de energie înaltă studiată în experimentul de la Stanford. Cele mai spectaculoase testări ale teoriei electrolabe au fost fără îndoială experimentele efectuate la CERN de un grup condus de Carlo Rubbia. În 1983 ei au descoperit particulele W , iar în 1984 particula Z , particule ale căror existență și proprietăți fuseseră în mod corect prezise de teoria electrolabă în versiunea ei inițială.

Privind în urmă către toate aceste întâmplări, regret că am pierdut atâta timp încercând să modific teoria electrolabă pentru a o pune în acord cu datele de la Oxford și Seattle. Trebuia să fi mers la Yosemite, așa cum plănuisem în 1977; încă n-am ajuns acolo. Întreaga poveste ilustrează o maximă oarecum ironică a lui Eddington: „Nu trebuie niciodată să te încrezi într-un experiment până nu e confirmat de teorie.“

Nu vreau să las impresia că întotdeauna există acest raport între teorie, experiment și progresul științei. Am subliniat aici importanța teoriei fiindcă vreau să contracarez o perspectivă larg răspândită care mi se pare exagerat empiristă. În realitate, dacă parcurgem istoria experimentelor importante din fizică, putem găsi diverse roluri jucate de aceste experimente și diverse moduri în care teoria

a interacționat cu experimentul. S-ar părea că orice spui despre felul în care teoria și experimentul *ar putea* interacționa e probabil să fie corect, iar orice spui despre felul în care teoria și experimentul *trebuie* să interacționeze e probabil să fie fals.

Căutarea forțelor slabe ale curenților neutri la CERN și Fermilab oferă un exemplu privind acel tip de experimente efectuate pentru a testa ideile teoretice care nu sunt încă general acceptate. Aceste experimente uneori confirmă, iar alteori infirmă ideile teoretice. Cu câțiva ani în urmă, Frank Wilczek și cu mine am prezis în mod independent un nou tip de particulă. Am căzut de acord să numim această particulă *axion*, fără să știm că era și numele unei mărci de detergenți. Experimentatorii au căutat axionul și nu l-au găsit – cel puțin nu cu proprietățile pe care noi le anticipaserăm. Ideea fie e incorectă, fie trebuie modificată. Am primit odată un mesaj de la un grup de fizicieni întruniți la Aspen, care spunea „L-am găsit!“, dar mesajul era lipit de o cutie de detergent.

Există de asemenea experimente care ne oferă surprize totale, pe care nici un teoretician nu le anticipase. În această categorie intră experimentele care au dus la descoperirea radiațiilor X sau a așa-numitelor particule stranii – ori la descoperirea anomaliei legate de precesia orbitei lui Mercur, despre care am vorbit. Acestea cred că sunt experimentele care aduc cea mai mare bucurie în inimile experimentatorilor și jurnaliștilor.

Există și experimente care ne oferă surprize *aproape* totale – adică pun în evidență fenomene care fuseseră discutate ca o posibilitate, însă doar ca o posibilitate logică pentru care nu existau argumente întemeiate. Printre acestea se numără experimentele care au pus în evidență violarea așa-numitei simetrii la inversia temporală, precum și experimentele care au dus la descoperirea unor particule noi, cum sunt cuarcii „bottom“ și un tip de electron foarte greu numit leptonul tau.

Există de asemenea o interesantă clasă de experimente care au evidențiat fenomene prezise de teoreticieni, dar descoperirea s-a produs întâmplător: experimentatorii nu cunoșteau predicțiile fie pentru că teoreticienii nu avuseseră suficientă încredere în teoriile lor și nu-i anunțaseră pe experimentatori, fie pentru că nu funcționase bine comunicarea științifică. Între acestea se numără descoperirea

radiației cosmice de fond, rămasă în urma big bang-ului, și descoperirea pozitronului.

Mai sunt apoi experimentele întreprinse chiar dacă se cunoaște răspunsul, chiar dacă predicțiile teoretice sunt atât de solide încât teoria e în afara oricărei îndoieli, deoarece fenomenele în sine sunt atât de interesante și oferă atât de multe posibilități pentru noi experimente, încât pur și simplu trebuie mers mai departe și trebuie aflate aceste lucruri. Aș include în această categorie descoperirea antiprotonului și a neutrinului, precum și mai recenta descoperire a particulelor W și Z . Din această categorie face de asemenea parte căutarea diverselor efecte exotice prezise de relativitatea generală, cum ar fi radiația gravitațională.

În fine, ne putem imagina o categorie de experimente care *infirmă* teorii larg acceptate, teorii care au obținut consensul fizicienilor. *Pentru această categorie nu pot găsi nici un exemplu în ultima sută de ani.* Există desigur multe cazuri în care s-a dovedit că teoriile aveau un domeniu de aplicare mai îngust decât se crezuse. Teoria newtoniană a mișcării nu se aplică la viteze mari. Paritatea, simetria între stânga și dreapta, nu funcționează în cazul forțelor slabe. Și așa mai departe. Dar în acest secol nici o teorie general acceptată în lumea fizicii nu s-a dovedit a fi pur și simplu o *greșeală* în felul în care au fost greșite teoria ptolemeică a epiciclorilor pentru mișcarea planetară sau teoria conform căreia căldura e un fluid caloric. Mai mult, în acest secol, după cum am văzut în cazul relativității generale și al teoriei electroslabă, s-a ajuns la consens în favoarea teoriilor fizice pe baza unor judecăți estetice, înainte ca dovezile experimentale pentru aceste teorii să devină cu adevărat convingătoare. Văd aici remarcabila putere a simțului estetic al fizicienilor acționând în conjuncție și uneori chiar în opoziție cu greutatea dovezilor experimentale.

Așa cum apare din prezentarea mea, drumul descoperirilor și validărilor în știință pare destul de întortocheat. În această privință, există o frumoasă paralelă între istoria militară și istoria științei. În ambele cazuri, comentatorii au căutat reguli sistematice care să explice de ce șansele de succes ale cuiva erau maxime – altfel spus, au încercat să ajungă la o știință a războiului sau la o știință a științei. Aceasta probabil fiindcă în istoria științei și în istoria

militară, într-o măsură mult mai mare decât în istoria politică, culturală sau economică, se poate trage o linie de demarcație destul de netă între victorie și înfrângere. Putem să ne contrazicem la nesfârșit asupra cauzelor și efectelor Războiului Civil american, dar nu încapă nici o îndoială că armata lui Meade a înfrânt la Gettysburg armata lui Lee. În același fel, nu încapă nici o îndoială că perspectiva lui Copernic asupra sistemului solar e mai bună decât cea a lui Ptolemeu, iar perspectiva evoluționistă a lui Darwin e mai bună decât cea a lui Lamarck.

Chiar dacă nu încearcă să formuleze o știință a războiului, istoricii militari scriu adesea ca și cum generalii ar pierde bătălii pentru că nu urmează niște reguli bine stabilite ale științei militare. De pildă, doi dintre generalii mult criticați ai armatei unioniste din Războiul Civil sunt George McClellan și Ambrose Burnside. Lui McClellan i se reproșează faptul că a evitat o confruntare directă cu inamicul, armata lui Lee din Virginia de Nord. Burnside e învinuit că a sacrificat viețile soldaților săi într-un atac năvalnic asupra unui inamic bine fortificat la Fredericksburg. Ați remarcat desigur că McClellan e criticat pentru că nu a acționat ca Burnside, iar Burnside e criticat pentru că nu acționat ca McClellan. Ambii au comis mari erori, dar asta nu fiindcă n-ar fi urmat reguli bine stabilite ale științei militare.

Cei mai buni istorici militari recunosc dificultatea stabilirii unor reguli pe care generalii ar trebui să le urmeze. Ei nu vorbesc despre o știință a războiului, ci mai degrabă despre un tipar al comportamentului militar care nu poate fi predat sau stabilit cu precizie, dar care într-un fel sau altul ajută uneori la câștigarea bătăliilor. Aceasta este arta războiului. În același sens cred că nu trebuie căutată o știință a științei, formularea unor reguli precise cărora ar trebui să li se conformeze savanții, ci doar să se încerce descrierea acelui tip de comportament care, de-a lungul istoriei, a condus la progresul științei – o artă a științei.

CAPITOLUL VI

Teorii frumoase

*Când pe vreun nor cu floricele smălțuit
Ore în șir ar rătăci sufletu-mi obosit
Și ar căuta în aste slabe glorii
Vreo umbră a eternității.*

HENRY VAUGHN, *Retragerea*

În 1974 Paul Dirac a venit la Harvard pentru a vorbi despre contribuția sa istorică la întemeierea electrodinamicii cuantice moderne. Spre sfârșitul prelegerii, s-a adresat studenților noștri sfătuindu-i să se concentreze numai asupra frumuseții ecuațiilor, și nu asupra semnificației lor. Nu era un sfat bun pentru studenți, dar căutarea frumuseții în fizică a fost o temă care a însoțit întreaga activitate științifică a lui Dirac și o bună parte din istoria fizicii.

Unele discursuri despre importanța frumuseții în știință sunt mai curând efuziuni sentimentale. Nu mi-am propus să folosesc acest capitol pentru a spune alte lucruri înălțătoare despre frumusețe. Aș vrea în schimb să mă concentrez asupra naturii frumuseții în teoriile fizice, să explic de ce simțul estetic e uneori o călăuză utilă, iar alteori nu, și să arăt că fertilitatea acestui simț estetic este un semn al progresului nostru spre o teorie finală.

Un fizician care spune că o teorie e frumoasă nu înțelege prin asta ce înțelegem de regulă când spunem că o pictură, o piesă muzicală sau o poezie sunt frumoase. Nu e simpla expresie personală a plăcerii estetice; seamănă mai curând cu ce simte un antrenor de cai când privește un cal de curse și spune că e un cal frumos. Antrenorul exprimă desigur o părere personală, dar e o părere despre un fapt obiectiv: anume că, pe baza unor judecăți greu de transpus în cuvinte, acesta e tipul de cal care câștigă cursele.

Desigur, diferiți antrenori pot judeca un cal în mod diferit, altminteri cursele de cai nu și-ar mai avea rostul. Dar simțul estetic

al antrenorului este un mijloc de a ajunge la un scop obiectiv – acela de a selecționa cai câștigători. Simțul estetic al fizicianului se presupune că servește de asemenea unui scop – îl ajută pe fizician să selecteze ideile care ne permit să explicăm natura. Fizicienii, la fel ca antrenorii de cai, pot avea dreptate sau se pot înșela în judecățile lor, dar nu se reduce totul la propria lor plăcere. De multe ori ei *chiar* simt o plăcere, însă nu acesta e scopul adevărat al judecăților estetice pe care le fac.

Această comparație aduce cu sine mai multe întrebări decât răspunsuri. În primul rând, ce *este* o teorie frumoasă? Care sunt caracteristicile teoriilor fizice care ne dau senzația de frumos? O întrebare și mai dificilă: De ce dă rezultate simțul estetic al fizicianului, atunci când într-adevăr dă rezultate? Poveștile din capitolul precedent ilustrează straniu faptul că un lucru atât de personal și subiectiv cum e simțul nostru estetic ne ajută nu doar să inventăm teorii fizice, dar și să judecăm valabilitatea teoriilor. De ce suntem binecuvântați cu o asemenea intuiție estetică? Efortul de a răspunde la această întrebare conduce la o alta, mai dificilă, deși sună probabil banal: Ce anume dorește să realizeze fizicianul?

Ce este o teorie frumoasă? Custodele unui mare muzeu de artă american m-a privit indignat atunci când am folosit cuvântul „frumusețe” în legătură cu fizica. El a spus că în domeniul lui de activitate profesioniștii au încetat să folosească acest cuvânt deoarece și-au dat seama că e imposibil de definit. Cu mult timp în urmă, fizicianul și matematicianul Henri Poincaré recunoștea că „este foarte greu să definești frumusețea matematică, dar ea e la fel de reală ca toate celelalte feluri de frumusețe”.

Nu voi încerca să definesc frumusețea, așa cum n-aș încerca să definesc dragostea sau teama. Aceste lucruri nu se definesc; le cunoaștem atunci când le simțim. Mai târziu, post factum, putem spune uneori câteva cuvinte pentru a le descrie, iar asta voi încerca eu să fac aici.

Prin frumusețea unei teorii fizice nu înțeleg, desigur, simpla frumusețe mecanică a simbolurilor de pe pagina tipărită. Poetul metafizic Thomas Traherne era preocupat ca poeziile sale să arate frumos în pagină, dar asta n-are legătură cu fizica. De asemenea trebuie să fac distincția între genul de frumusețe despre care

vorbesc aici și calitatea pe care matematicienii și fizicienii o numesc uneori eleganță. O demonstrație elegantă sau un calcul elegant sunt acelea prin care ajungi la rezultate importante cu un minimum de complicații irelevante. Pentru frumusețea unei teorii nu contează dacă ecuațiile sale au soluții elegante. Ecuațiile relativității generale sunt faimoase pentru dificultatea rezolvării lor, cu excepția situațiilor simple, dar asta nu știrbește frumusețea teoriei în sine. După cum spunea Einstein, savanții ar trebui să lase eleganța în seama croitorilor.

Simplitatea e o parte din ceea ce înțeleg eu prin frumusețe, dar e o simplitate a ideilor, nu e o simplitate de tip mecanic care poate fi măsurată numărând ecuațiile sau simbolurile. Atât teoria lui Einstein, cât și cea a lui Newton despre gravitație implică ecuații care descriu forțele gravitaționale produse de orice cantitate dată de materie. În teoria lui Newton există trei asemenea ecuații (corespunzând celor trei dimensiuni ale spațiului) – în teoria lui Einstein sunt paisprezece. Acest fapt în sine nu poate fi considerat drept un avantaj estetic al teoriei lui Newton față de cea a lui Einstein, și de fapt teoria lui Einstein e mai frumoasă, în parte datorită simplității ideii sale centrale privind echivalența dintre gravitație și inerție. Oamenii de știință sunt în general de acord cu această judecată și, după cum am văzut, în bună măsură grație ei teoria lui Einstein a fost repede acceptată.

Există o altă calitate în afara simplității care poate face ca o teorie fizică să fie frumoasă – sentimentul de inevitabil pe care ni-l dă teoria. Ascultând o piesă muzicală sau un sonet simțim uneori o plăcere estetică intensă dată de senzația că nimic din lucrare nu ar putea fi schimbat, că fiecare notă sau fiecare cuvânt se află la locul potrivit. În *Sfânta Familie* a lui Rafael poziția fiecărui personaj pe pânză este perfectă. S-ar putea să nu fie pictura dumneavoastră preferată între toate câte există pe lume, dar când o privești n-ai vrea ca Rafael să fi pictat altfel. Același lucru e adevărat în parte (nu există decât adevăruri parțiale) despre relativitatea generală. Odată ce cunoști principiile fizice generale adoptate de Einstein, înțelegi că el nu putea fi condus spre o altă teorie a gravitației semnificativ diferită. Einstein spunea despre relativitatea generală: „Principală forță de atracție a teoriei e

coerența ei logică. Dacă una singură dintre concluziile ce rezultă din ea se dovedește a fi greșită, teoria trebuie abandonată; pare imposibil s-o modifice fără să-i distrugi întreaga structură.“

Acest lucru e mai puțin adevărat în cazul teoriei newtoniene a gravitației. Newton ar fi putut presupune că forța gravitațională scade cu inversul cubului distanței în loc de inversul pătratului, dacă asta ar fi impus datele astronomice, dar Einstein nu ar fi putut încorpora o lege a inversului cubului în teoria sa fără a-i distruge bazele conceptuale. De aceea cele paisprezece ecuații ale lui Einstein au un caracter inevitabil și deci o frumusețe care lipsește celor trei ecuații ale lui Newton. Cred că asta a vrut să spună Einstein atunci când a considerat că acea parte a ecuațiilor din relativitatea generală în care apare câmpul gravitațional e frumoasă, de parcă ar fi din marmură, spre deosebire de cealaltă parte a ecuațiilor, referitoare la materie, despre care spunea că a rămas urâtă, de parcă ar fi din lemn. Modul în care câmpul gravitațional intră în ecuațiile lui Einstein este aproape inevitabil, dar nimic din relativitatea generală nu explică de ce materia ia forma pe care o ia.

Aceeași senzație de inevitabil poate fi găsită (din nou, numai în parte) în modelul standard modern al forțelor tari și electrolabe care acționează asupra particulelor elementare. Există o trăsătură comună care dă în cea mai mare măsură, atât relativității generale, cât și modelului standard, senzația de inevitabil și de simplitate: ele se supun *principiilor de simetrie*.

Un principiu de simetrie e pur și simplu o afirmație că un anumel lucru arată la fel din diferite perspective. Dintre toate simetriile de acest tip, cea mai simplă e simetria bilaterală aproximativă a feței umane. Deoarece există puține diferențe între cele două laturi ale feței, ea ne apare la fel, fie că e privită direct, fie că dreapta și stânga sunt inversate, ca atunci când privim în oglindă. A devenit aproape un loc comun în cinematografie efectul prin care îi faci pe spectatori să-și dea seama brusc că figura actorului pe care o priveau era văzută în oglindă; surpriza ar dispărea dacă oamenii ar avea ambii ochi pe o parte a feței, așa cum are cambula, și întotdeauna pe aceeași parte.

Unele obiecte au simetrii mai extinse decât fața umană. Un cub arată la fel când e privit din șase direcții diferite, fiecare

perpendiculară pe celelalte, precum și atunci când stânga și dreapta sunt inversate. Cristalele perfecte arată la fel nu numai dacă le privim din direcții diferite, dar și dacă ne deplasăm în cristal pe anumite distanțe în diferite direcții. O sferă arată la fel din orice direcție. Spațiul gol arată la fel din toate direcțiile și din toate pozițiile.

Asemenea simetrii i-au amuzat și intrigat pe artiști și pe savanți de mii de ani, dar nu au jucat un rol cu adevărat esențial în știință. Cunoaștem multe lucruri despre sare, iar faptul că este un cristal cubic și deci arată la fel din șase direcții diferite nu se numără printre cele mai importante. Evident, simetria bilaterală nu este cel mai interesant lucru care se poate spune despre chipul uman. Simetriile care sunt cu adevărat importante în natură nu sunt simetriile *obiectelor*, ci simetriile *legilor*.

O simetrie a legilor naturii face ca, atunci când schimbăm într-un anume fel perspectiva din care observăm fenomenele naturale, legile naturii pe care le descoperim să nu se schimbe. Asemenea simetrii sunt numite deseori principii de *invariantă*. De pildă, legile naturii pe care le descoperim iau aceeași formă indiferent de orientarea laboratoarelor noastre; nu contează dacă măsurăm direcțiile în raport cu nord, nord-est, sus sau orice altă direcție. Acest lucru nu era atât de evident pentru filozofii naturii din Antichitate sau din Evul Mediu; în viața de toate zilele pare să existe o diferență între sus, jos și direcțiile orizontale. Numai după apariția științei moderne în secolul al XVII-lea a devenit limpede faptul că jos diferă de sus sau nord numai pentru că sub noi există o masă mare, Pământul, iar nu (așa cum credea Aristotel) pentru că locul firesc al obiectelor grele sau ușoare e jos sau sus. Remarcați că această simetrie nu spune că sus e același lucru cu jos; observatorii care măsoară distanțe în sus sau în jos în raport cu suprafața Pământului dau descrieri diferite ale unor evenimente cum e căderea unui măr, însă descoperă aceleași legi, de pildă legea conform căreia merele sunt atrase de masele mari cum e Pământul.

De asemenea, legile naturii iau aceeași formă indiferent de poziția laboratoarelor noastre; rezultatele noastre sunt aceleași fie că efectuăm experimentele în Texas, în Elveția sau pe vreo planetă de cealaltă parte a galaxiei. Legile naturii iau aceeași formă indiferent cum ne potrivim ceasurile; nu are importanță dacă datăm

evenimentele pornind de la Hegira, de la nașterea lui Cristos sau de la începutul universului. Asta nu înseamnă că nimic nu se schimbă cu timpul sau că statul Texas e totuna cu Elveția, ci doar că legile descoperite în momente și locuri diferite sunt aceleași. Dacă nu ar exista aceste simetrii, cercetarea științifică ar trebui refăcută în fiecare nou laborator și în fiecare moment.

Orice principiu de simetrie este în același timp un principiu de simplitate. Dacă legile naturii ar distinge între direcții cum sunt sus, jos sau nord, ar trebui să adăugăm ceva în ecuațiile noastre pentru a ține seama de orientarea laboratoarelor noastre, iar acestea ar deveni mai puțin simple. Într-adevăr, însăși notația folosită de matematicieni și fizicieni pentru a face ca ecuațiile să arate cât mai simplu și mai compact cu putință conține implicit presupunerea că toate direcțiile din spațiu sunt echivalente.

Aceste simetrii ale legilor naturii sunt importante în fizica clasică, dar și mai importante în mecanica cuantică. Prin ce diferă un electron de altul? Numai prin energia, impulsul și spinul său; în afara acestor proprietăți fiecare electron din univers e la fel ca oricare altul. Toate aceste proprietăți ale electronului sunt mărimi ce caracterizează modul în care funcția de undă a electronului răspunde la transformările de simetrie: la schimbarea felului în care ne potrivim ceasurile, la schimbarea poziției sau orientării laboratoarelor noastre*. Prin urmare, materia își pierde rolul central

* De exemplu, frecvența cu care oscilează funcția de undă a oricărui sistem într-o stare cu energie bine definită e dată de energia împărțită la o constantă a naturii numită constanta lui Planck. Acest sistem apare la fel pentru doi observatori care și-au potrivit ceasurile cu un decalaj de o secundă, dar dacă ambii observă sistemul atunci când limbile ceasurilor lor arată exact ora douăsprezece la amiază, ei observă că oscilația are o fază diferită; deoarece ceasurile lor sunt potrivite diferit, ei observă într-adevăr sistemul la timpi diferiți, astfel încât un observator poate vedea, de pildă, o creastă a unde, iar celălalt o vale. Mai precis, faza diferă prin numărul de cicli (sau părți de ciclu) care au loc într-o secundă; cu alte cuvinte, prin frecvența oscilației în cicli pe secundă, și deci prin energia împărțită la constanta lui Planck. În mecanica cuantică *definim* energia unui sistem ca schimbarea fazei (în cicli sau părți de ciclu) funcției de undă a sistemului la un anume moment indicat de *ceas* atunci când decalăm modul de potrivire a ceasului cu o secundă.

în fizică: ceea ce rămâne sunt numai principiile de simetrie și diferitele moduri în care funcțiile de undă se pot comporta la transformările de simetrie.

Există simetrii ale spațiului-timp care sunt mai puțin evidente decât aceste simple translații și rotații. Legile naturii iau de asemenea aceeași formă pentru observatori aflați în mișcare cu diferite viteze constante; nu e nici o diferență dacă ne efectuăm experimentele aici, în sistemul nostru solar, sau zburăm prin galaxie cu sute de kilometri pe secundă sau ne aflăm într-o altă galaxie ce se îndepărtează de a noastră cu zeci de mii de kilometri pe secundă. Acest principiu de simetrie e numit uneori principiul relativității. Se crede în genere că acest principiu a fost inventat de Einstein, dar exista și un principiu al relativității în mecanica newtoniană; diferența ține numai de felul în care viteza observatorului afectează observarea pozițiilor și timpilor în cele două teorii. Newton însă a considerat propria versiune a principiului relativității ca fiind

Constanta lui Planck apare numai pentru că ne-am obișnuit să măsurăm energia în unități precum caloria, kilowatul-oră sau electron-voltul, care au fost adoptate înainte de apariția mecanicii cuantice. Constanta lui Planck nu oferă decât factorul de conversie între aceste sisteme de unități mai vechi și unitatea naturală de energie din mecanica cuantică, care este cicli pe secundă. Se poate demonstra că energia definită în acest mod are toate proprietățile pe care le asociem în mod normal cu energia, inclusiv aceea de conservare; într-adevăr, invarianța legilor naturii la transformarea de simetrie reprezentată de repotrivirea ceasurilor este *explicația* existenței unei mărimi precum energia. Într-un mod foarte asemănător, componenta impulsului unui sistem pe o anumită direcție e definită ca schimbarea fazei funcției de undă atunci când deplasăm originea măsurării pozițiilor cu un centimetru în acea direcție, înmulțită din nou cu constanta lui Planck. Mărimea spinului unui sistem în raport cu o axă e definită ca schimbarea fazei funcției de undă când sistemul de referință pe care îl folosim la măsurarea direcțiilor efectuează o rotație completă în jurul acelei axe, înmulțită cu constanta lui Planck. Din acest punct de vedere impulsul și spinul sunt ceea ce sunt datorită simetriei legilor naturii la transformările sistemului de referință pe care îl folosim pentru a măsura pozițiile sau direcțiile din spațiu. (În enumerarea proprietăților electronilor nu am inclus și poziția, deoarece poziția și impulsul sunt proprietăți complementare; putem descrie starea unui electron prin poziție *sau* prin impuls, dar nu prin ambele simultan.) (*N.a.*)

de la sine înțeleasă, în timp ce Einstein și-a conceput versiunea principiului relativității anume pentru a fi în acord cu un fapt experimental – viteza luminii e aceeași indiferent de mișcarea observatorului. În acest sens, accentul pus pe simetrie ca problemă a fizicii în articolul lui Einstein din 1905 despre relativitatea specială marchează începutul atitudinii moderne în legătură cu principiile de simetrie.

Cea mai importantă deosebire între modul în care observarea pozițiilor din spațiu-timp e afectată de mișcarea observatorului în fizica lui Newton și în cea a lui Einstein este că în relativitatea specială e lipsită de sens afirmația că două evenimente care se petrec în puncte diferite sunt simultane. Un observator poate vedea că două ceasuri arată ora douăsprezece în același timp; un alt observator, care se mișcă față de primul, găsește că un ceas arată ora douăsprezece înainte sau după celălalt. Așa cum am subliniat mai sus, aceasta face ca teoria newtoniană a gravitației, sau orice altă teorie asemănătoare a forțelor, să fie incompatibilă cu relativitatea specială. Teoria lui Newton afirmă că forța gravitațională pe care Soarele o exercită asupra Pământului la un moment dat depinde de poziția masei Soarelui din același moment, dar același moment din perspectiva cui?

Calea firească de a evita această problemă este abandonarea vechii idei newtoniene a acțiunii instantanee la distanță și înlocuirea ei cu o descriere în care forța se datorează *câmpurilor*. În această descriere Soarele nu atrage direct Pământul, ci creează un câmp, numit câmp gravitațional, care exercită apoi o forță asupra Pământului. Aceasta ar putea părea o distincție nesemnificativă, dar există o diferență crucială: când are loc o erupție solară, la început ea afectează câmpul gravitațional numai în apropierea Soarelui, după care mica schimbare a câmpului se propagă prin spațiu cu viteza luminii, la fel ca undele formate la căderea unei pietre în apă, atingând Pământul abia cu aproximativ opt minute mai târziu. Toți observatorii aflați în mișcare cu o viteză constantă oarecare cad de acord asupra acestei descrieri, deoarece în relativitatea specială toți observatorii de acest tip cad de acord asupra valorii vitezei luminii. În același fel, un corp încărcat electric creează un câmp, numit câmp electromagnetic, care exercită forțe electrice și magnetice asupra altor corpuri încărcate. Când un corp încărcat

electric se mișcă brusc, câmpul electromagnetic se modifică la început numai în apropierea aceluia corp, iar modificările câmpului se propagă apoi cu viteza luminii. De fapt, în acest caz modificările câmpului electromagnetic *sunt* ceea ce numim lumină, deși adesea e vorba de o lumină ale cărei lungimi de undă sunt prea mari sau prea mici pentru ca ea să fie vizibilă.

În cadrul fizicii precuantice, teoria specială a relativității era conformă cu o viziune dualistă asupra naturii: există particule, ca electronii, protonii și neutronii din atomii obișnuți, și există câmpuri, cum ar fi câmpul gravitațional sau cel electromagnetic. Apariția mecanicii cuantice a condus la o perspectivă mult mai unitară. Din punct de vedere cuantic, energia și impulsul unui câmp cum e cel electromagnetic sosesc în pachete numite fotoni, care se comportă exact ca particulele, dar particule cu masă nulă. În mod asemănător, energia și impulsul câmpului gravitațional sosesc în pachete numite gravitoni, care de asemenea se comportă ca particule cu masă nulă. Într-un câmp de forță la scară mare, cum e câmpul gravitațional al Soarelui, nu observăm gravitoni individuali fiindcă aceștia sunt foarte numeroși.

În 1929, Werner Heisenberg și Wolfgang Pauli (pornind de la cercetări mai vechi ale lui Max Born, Heisenberg, Pascual Jordan și Eugene Wigner) au explicat în două articole că particule cu masă nenulă precum electronul ar putea fi de asemenea privite ca pachete de energie și impuls ale altor tipuri de câmpuri, cum e câmpul electronic. La fel cum forța dintre doi electroni se datorează, în mecanica cuantică, schimbului de fotoni, forța dintre fotoni și electroni se datorează schimbului de electroni. Distincția între materie și forță dispare în bună măsură; orice particulă poate juca rolul corpului de probă asupra căruia acționează forțe, iar prin schimbul ei pot fi generate alte forțe. Astăzi e unanim acceptat faptul că singura cale de a combina principiile relativității speciale cu mecanica cuantică este teoria cuantică a câmpurilor sau ceva foarte asemănător. Acesta este tocmai acel tip de rigiditate logică ce dă frumusețe unei teorii cu adevărat fundamentale: mecanica cuantică și relativitatea specială sunt aproape incompatibile, iar reconcilierea lor prin teoria cuantică a câmpurilor impune

restricții puternice asupra felului în care particulele pot interacționa între ele.

Toate simetriile menționate până acum limitează numai genurile de forță și materie pe care o teorie le poate conține – ele în sine nu *impun* existența vreunui tip anume de materie sau de forță. Principiile de simetrie au devenit încă mai importante în acest secol, în special în ultimele decenii: există principii de simetrie care dictează însăși existența tuturor forțelor cunoscute în natură.

În relativitatea generală, principiul de simetrie fundamental afirmă că *toate* sistemele de referință sunt echivalente: legile naturii arată la fel nu numai pentru observatori ce se deplasează cu viteză constantă, ci pentru toți observatorii, indiferent de accelerația sau rotația laboratoarelor lor. Să presupunem că mutăm aparatura noastră din liniștea unui laborator universitar și că ne efectuăm experimentele pe platforma unui carusel ce se rotește uniform. În loc să măsurăm direcțiile în raport cu nordul, le măsurăm în raport cu căluții fixați pe platforma rotitoare. La prima vedere, legile naturii vor părea complet diferite. Observatorii din carusel resimt o forță centrifugă care pare să tragă obiectele spre exteriorul caruselului. Dacă observatorii sunt născuți și crescuți în carusel și nu știu că se află pe o platformă rotitoare, ei descriu natura în termenii unor legi mecanice care încorporează această forță centrifugă, legi care par destul de diferite față de cele descoperite de noi.

Faptul că legile naturii par să facă distincție între sistemele de referință staționare și cele în rotație l-a deranjat pe Isaac Newton și a continuat să-i tulbure pe fizicieni și în secolele următoare. În anii 1880, fizicianul și filozoful vienez Ernst Mach a indicat o posibilă reinterpretare. Mach a arătat că, în afară de forța centrifugă, există și altceva care deosebește caruselul rotitor de laboratoarele mai convenționale. Din perspectiva unui astronom aflat în carusel, Soarele, stelele, galaxiile – și întreaga materie din univers – par să se rotească în jurul zenitului. Noi am spune că aceasta se datorează rotației caruselului, dar un astronom care a crescut în carusel și care în chip firesc îl folosește drept sistem de referință ar fi convins că restul universului se învâрте în jurul său. Mach s-a întrebat dacă există vreo cale prin care această vastă circulație aparentă a materiei să explice forța centrifugă. Dacă acest lucru

e cu puțință, atunci legile naturii descoperite în carusel ar putea fi de fapt aceleași cu cele descoperite în laboratoarele mai convenționale; diferența aparentă s-ar datora pur și simplu mediului diferit văzut de observatori din laboratoarele lor diferite.

Ideea lui Mach a fost preluată de Einstein și concretizată în teoria relativității generale. În relativitatea generală există într-adevăr o influență exercitată de stelele îndepărtate care creează fenomenul forței centrifuge într-un carusel rotitor: forța gravitațională. Desigur, nimic asemănător nu se întâmplă în teoria newtoniană a gravitației, care se ocupă doar de simpla atracție între toate masele. Relativitatea generală e mai complicată; circulația materiei din univers în jurul zenitului văzută de observatorii din carusel produce un câmp oarecum asemănător câmpului magnetic produs de circulația electricității în spirele unei bobine. Acest câmp „gravito-magnetic“ este acela care produce în sistemul de referință al caruselului efectele care în sisteme de referință mai convenționale sunt atribuite forței centrifuge. Ecuațiile relativității generale, spre deosebire de cele ale mecanicii newtoniene, sunt exact aceleași în laboratorul din carusel și în laboratoare convenționale; diferența dintre ce se observă în aceste laboratoare se datorează în întregime mediului lor diferit – un univers care se rotește în jurul zenitului sau unul care nu se rotește. Dar, dacă gravitația nu ar exista, această reinterpretare a forței centrifuge ar fi imposibilă, iar forța centrifugă resimțită într-un carusel ne-ar permite să distingem între carusel și laboratoare mai convenționale, iar astfel ar face imposibilă echivalența între laboratoarele care se rotesc și cele care nu se rotesc. *Prin urmare, simetria între diferitele sisteme de referință impune existența gravitației.*

Simetria care stă la baza teoriei electrolabe este ceva mai ezoterică. Ea nu se referă la schimbări în perspectiva noastră din spațiu și timp, ci la schimbări în perspectiva noastră asupra identității diferitelor tipuri de particule elementare. Așa cum e posibil ca o particulă să se afle într-o stare cuantică în care nu se poate spune cu precizie că este nici aici, nici acolo, sau ca spinul ei să nu fie cu precizie nici în sensul acelor de ceasornic, nici în sens contrar, la fel, grație minunilor mecanicii cuantice, e posibil ca o particulă să se afle într-o stare în care nu este cu precizie nici

electron, nici neutrin, până când măsurăm o proprietate care să distingă între cele două posibilități, de pildă, sarcina electrică. În teoria electroslabă forma legilor naturii e neschimbată dacă înlocuim electronii și neutrinii pretutindeni în ecuațiile noastre cu asemenea stări amestecate care nu sunt nici electroni, nici neutrii. Deoarece diferite alte tipuri de particule interacționează cu electronii și neutrinii, trebuie în același timp să amestecăm familiile acestor alte tipuri de particule, cum ar fi cuarcii „up” cu cuarcii „down”, precum și fotonii cu rudele lor, particulele W încărcate pozitiv și negativ și particulele neutre Z . Aceasta este simetria care leagă forțele electromagnetice, produse prin schimbul de fotoni, cu forțele nucleare slabe, care sunt produse prin schimbul de particule W și Z . Fotonul și particulele W și Z apar în teoria electroslabă ca pachetele de energie a patru câmpuri, câmpuri care sunt impuse de această simetrie a teoriei electroslabă cam la fel cum câmpul gravitațional e impus de simetriile relativității generale.

Simetriile de tipul celei ce stă la baza teoriei electroslabă se numesc *simetrii interne*, deoarece ele se leagă de natura intrinsecă a particulelor, nu de poziția sau mișcarea lor. Simetriile interne sunt mai greu de imaginat decât cele care acționează asupra spațiului și timpului obișnuit, precum acelea care guvernează relativitatea generală. Vă puteți închipui că fiecare particulă are un mic cadran, cu un ac care indică în direcțiile marcate „electron”, „neutrîn”, „foton”, „ W ” sau în orice direcție intermediară. Simetria internă afirmă că legile naturii iau aceeași formă dacă rotim într-un anumit fel inscripțiile de pe aceste cadrane.

Mai mult, pentru tipul de simetrie care guvernează forțele electroslabă, putem roti în mod diferit cadranele pentru particule la momente de timp sau poziții diferite. Aceasta seamănă mult cu simetria ce stă la baza relativității generale, care ne permite să ne rotim laboratorul nu numai cu un unghi fix, dar și cu un unghi care crește în timp, plasându-l într-un carusel. Invarianța legilor naturii la un asemenea grup de transformări de simetrie internă dependente de poziție și de timp se numește simetrie *locală* (deoarece efectul transformărilor de simetrie depinde de localizarea în spațiu și timp) sau simetrie de *etalonare* (din motive pur istorice). Simetria locală între diferitele sisteme de referință în spațiu și timp

este cea care impune existența gravitației, iar, în mod asemănător, a doua simetrie locală între electroni și neutrini (și între cuarcii „up“ și cuarcii „down“ etc.) este cea care impune existența câmpurilor fotonului și particulelor W și Z .

Există și o a treia simetrie locală asociată cu proprietatea internă a cuarcilor numită *culoare*. Am văzut că există diferite tipuri de cuarci, cum sunt cuarcii „up“ și „down“ care compun protonii și neutronii din toate nucleele atomice obișnuite. În plus, fiecare dintre aceste tipuri de cuarci poate avea trei „culori“ diferite, pe care fizicienii (cel puțin cei din Statele Unite) le numesc adesea roșu, alb și albastru.* Desigur, ele n-au nici o legătură cu culorile obișnuite, sunt doar nume folosite pentru a distinge între diferitele sub-specii de cuarci. Din câte știm, în natură există o simetrie perfectă între diferitele culori; forța dintre un cuarc roșu și un cuarc alb este aceeași cu cea dintre un cuarc alb și un cuarc albastru, iar forța dintre doi cuarci roșii este aceeași cu cea dintre doi cuarci albaştri. Dar această simetrie e mai profundă decât simpla inter-schimbare a culorilor. În mecanica cuantică putem considera că starea unui cuarc nu e nici precis roșie, nici precis albă, nici precis albastră. Legile naturii iau exact aceeași formă dacă înlocuim cuarci roșii, albi și albaştri cu cuarci în trei stări potrivit amestecate (de pildă purpuriu, roz și mov). Din nou, prin analogie cu relativitatea generală, faptul că legile naturii nu sunt afectate chiar dacă amestecurile variază în timp și în spațiu impune cu necesitate includerea în teorie a unei familii de câmpuri care interacționează cu cuarcii, analogul câmpului gravitațional. Există opt asemenea câmpuri; ele se numesc câmpuri gluonice deoarece forțele tari pe care le produc lipsesc cuarcii laolaltă în interiorul protonului și neutronului.** Teoria noastră modernă privind aceste forțe, *cromodinamica cuantică*, nu este altceva decât teoria cuarcilor și gluonilor care respectă această simetrie locală de culoare. Modelul standard al particulelor elementare reprezintă combinarea teoriei electrolabe cu cromodinamica cuantică.

* În Europa, aceste „culori“ sunt „roșu“, „verde“, „albastru“. (N. red.)

** În engleză, *glue* înseamnă lipici, clei. (N. red.)

Am spus că principiile de simetrie dau teoriilor o anumită rigiditate. Ați putea crede că acesta e un neajuns, că fizicienii vor să elaboreze teorii care să descrie o mare diversitate de fenomene, și prin urmare și-ar dori să descopere teorii cât mai flexibile – teorii aplicabile într-o gamă largă de condiții posibile. Lucrul e valabil în multe domenii ale științei, dar nu și în acest gen de fizică fundamentală. Noi căutăm ceva universal – ceva care guvernează fenomenele fizice pretutindeni în univers – ceva ce numim legile naturii. Nu vrem să descoperim o teorie în stare să descrie toate tipurile imaginabile de forțe dintre particulele din natură, ci sperăm să găsim o teorie care ne va permite cu strictețe să descriem numai acele forțe – gravitațională, electrolabă și tare – care chiar există. Acest gen de rigiditate a teoriilor noastre fizice e o parte din ceea ce recunoaștem drept frumusețe.

Nu numai principiile de simetrie dau rigiditate teoriilor noastre. Doar pe baza principiilor de simetrie nu am fi putut ajunge la teoria electrolabă sau la cromodinamica cuantică – ele ar fi fost cazuri particulare pentru o diversitate mare de teorii cu un număr nelimitat de constante ajustabile ce pot lua orice valoare dorim. Constrângerea suplimentară, care ne-a permis să alegem modelul nostru standard simplu dintr-o mulțime de alte teorii mai complicate ce satisfac aceleași principii de simetrie, a fost condiția ca toți infinitii care apar în calculele teoriei să se anuleze. (Altfel spus, teoria trebuie să fie „renormabilă“.) Această condiție impune un mare grad de simplitate ecuațiilor teoriei și, împreună cu diferitele simetrii locale, ne apropie mult de forma unică a modelului standard al particulelor elementare.

Frumusețea teoriilor fizice cum sunt relativitatea generală sau modelul standard seamănă mult cu frumusețea pe care unele opere de artă o capătă prin senzația de inevitabil pe care ți-o dau – senzația că nu ai vrea să schimbi nici măcar o notă, o trăsătură de penel sau un vers. Dar, la fel ca în cazul muzicii, picturii sau poeziei, senzația de inevitabil ține de gust și experiență și nu poate fi redusă la o formulă.

La fiecare doi ani Laboratorul Lawrence Berkeley publică o broșură conținând proprietățile particulelor elementare conform celor mai recente date. Dacă aș spune că principiul fundamental

care guvernează natura este acela că particulele elementare au proprietățile enumerate în broșură, atunci ar fi fără îndoială adevărat că proprietățile cunoscute ale particulelor elementare rezultă inevitabil din acest principiu fundamental. Acest principiu are chiar și putere de predicție – fiecare nou electron sau proton creat în laboratoarele noastre va avea masa și sarcina menționate deja în broșură. Dar principiul în sine e atât de urât, încât nimeni nu ar avea senzația că s-a înfăptuit ceva. Urâtenia ține de lipsa simplității și inevitabilului – broșura conține mii de numere, iar fiecare poate fi schimbat fără ca restul informației să devină absurd. Nu există vreo formulă logică pentru a stabili o linie clară de demarcație între o teorie explicativă frumoasă și o banală listă de date, dar recunoaștem diferența când o vedem – noi cerem simplitate și rigiditate principiilor noastre înainte de a le lua în considerare. Astfel, judecata noastră estetică nu e doar un mijloc de a găsi explicații științifice și de a le evalua validitatea – *ea este o parte din ceea ce înțelegem prin explicație.*

Alți oameni de știință își bat joc uneori de fizicienii particulelor elementare fiindcă există acum atâtea particule așa-zis elementare încât ar trebui să avem mereu la noi broșura Berkeley pentru a ține minte toate particulele care au fost descoperite. Dar numărul particulelor în sine nu e important. După cum spunea Abdus Salam, natura nu face economie de particule sau de forțe, ci de principii. Este important să avem un set de principii simple și economice care să explice de ce particulele sunt așa cum sunt. Este supărător că nu avem încă o teorie de genul celei pe care o dorim. Dar, când o vom avea, nu va conta prea mult câte tipuri de particule sau de forțe descrie, atâta vreme cât o face frumos, ca o consecință inevitabilă a unor principii simple.

Teoriile fizice au un gen aparte de frumusețe. Ea este, pe cât am încercat s-o exprim în cuvinte, frumusețea simplității și inevitabilului – frumusețea structurii perfecte, frumusețea potrivirii tuturor elementelor în ansamblu, a neputinței de a schimba ceva, a rigidității logice. Este o frumusețe sobră și clasică, așa cum întâlnim în tragediile grecești. Dar acesta nu e unicul gen de frumusețe din artă. O piesă de Shakespeare nu are această frumusețe, oricum nu în măsura în care o au unele din sonetele lui. Deseori regizorul

unei piese shakespeareiene hotărăște să elimine discursuri întregi. În versiunea cinematografică a lui *Hamlet* realizată de Olivier, Hamlet nu spune „Ce ticălos, ce sclav nemernic sunt!”. Și totuși spectacolul rezistă, fiindcă piesele lui Shakespeare nu sunt structuri perfecte, rigide, ca relativitatea generală sau *Oedipus Rex*; ele sunt compoziții mari și întortocheate a căror dezordine reflectă complexitatea vieții. Aceasta face parte din frumusețea pieselor sale, o frumusețe care după gustul meu e de ordin superior frumuseții unei piese de Sofocle sau relativității generale. Unele dintre momentele spectaculoase la Shakespeare sunt cele în care el abandonează deliberat modelul tragediei grecești și introduce un plebeu comic – paznic, grădinar, vânzător de smochine sau gopar – imediat înainte ca personajele principale să-și întâlnească destinul. Fără îndoială că frumusețea fizicii teoretice ar fi un exemplu foarte rău pentru artă, dar, așa cum este ea, ne bucură inima și ne călăuzește.

Există și o altă privință în care mi se pare că fizica teoretică este un model rău pentru artă. Teoriile noastre sunt foarte ezoterice – iar aceasta în mod necesar, fiindcă suntem obligați să ne elaborăm teoriile folosind limbajul matematic, care nu face parte din cultura generală a publicului educat. De regulă, fizicienii regretă că teoriile lor sunt atât de ezoterice. Pe de altă parte, mi s-a întâmplat să aud artiști spunând cu mândrie că opera lor e accesibilă doar unui mic cerc de cunoscători, și justificându-și atitudinea prin citarea teoriilor fizice precum relativitatea generală, care la rândul lor pot fi înțelese numai de inițiați. Artiștii, ca și fizicienii, nu se pot face întotdeauna înțeleși de publicul larg, dar ezoterismul de dragul ezoterismului e pur și simplu o prostie.

Deși căutăm teorii care sunt frumoase datorită rigidității impuse de principii fundamentale simple, crearea unei teorii nu înseamnă doar deducerea ei matematică pornind de la un set de principii pre-determinate. Principiile noastre sunt adesea inventate pe măsură ce înaintăm, uneori tocmai fiindcă ele conduc la acea rigiditate pe care o dorim. Nu am nici o îndoială că unul din motivele pentru care Einstein a fost atât de încântat de ideea lui privind echivalența dintre gravitație și inerție a fost faptul că acest principiu conduce la o unică teorie a gravitației, nu la o diversitate infinită de posibile

teorii ale gravitației. Deducerea consecințelor unui set dat de principii fizice bine formulate poate fi dificilă sau ușoară, dar este acel gen de lucruri pe care fizicienii le învață în facultate și pe care le fac cu plăcere. Crearea de *noi* principii fizice este un chin și nu cred că poate fi predată.

În mod straniu, deși frumusețea teoriilor fizice e încorporată în structuri matematice rigide întemeiate pe principii fundamentale simple, structurile care au acest tip de frumusețe tind să supraviețuiască chiar și atunci când principiile fundamentale se dovedesc a fi false. Un bun exemplu este teoria electronului formulată de Dirac. În 1928, Dirac încerca să adapteze versiunea mecanicii cuantice a lui Schrödinger care făcea apel la unde de particule, astfel încât să fie compatibilă cu teoria specială a relativității. Acest efort l-a condus pe Dirac la concluzia că electronul trebuie să aibă un anumit spin și că universul e plin de electroni neobservabili având energie negativă, a căror *absență* într-un punct se manifestă în laborator prin prezența unui electron cu sarcină opusă, antiparticula electronului. Teoria sa a dobândit un prestigiu enorm odată cu descoperirea în 1932, în radiațiile cosmice, a unei asemenea antiparticule a electronului, particula numită acum pozitron. Teoria lui Dirac a fost un ingredient esențial în versiunea electrodinamicii cuantice, elaborată și aplicată cu mare succes în anii 1930–1940. Dar astăzi știm că perspectiva lui Dirac era greșită. Contextul potrivit pentru reconcilierea mecanicii cuantice cu relativitatea specială nu e acea versiune relativistă a mecanicii ondulatorii a lui Schrödinger pe care o căuta Dirac, ci formalismul mai general cunoscut sub numele de teoria cuantică a câmpului, introdus de Heisenberg și Pauli în 1929. În teoria cuantică a câmpului nu numai fotonul este un pachet de energie a unui câmp, câmpul electromagnetic; electronii și pozitronii sunt la rândul lor pachete de energie ale câmpului electronic, iar toate celelalte particule elementare sunt pachete de energie ale diferitelor altor câmpuri. Aproape din întâmplare teoria lui Dirac a dat aceleași rezultate ca teoria cuantică a câmpului pentru procese implicând numai electroni, pozitroni și/sau fotoni. Dar teoria cuantică a câmpului e mai generală – ea poate explica procese ca dezintegrarea nucleară beta, care nu puteau fi înțelese în teoria lui Dirac. Nu

există nimic în teoria cuantică a câmpului care să impună ca particulele să aibă un anumit spin. Electronul se întâmplă să aibă spinul cerut de teoria lui Dirac, dar există alte particule cu alți spini, iar aceste particule au antiparticule, și asta n-are nici o legătură cu energiile negative despre care Dirac a făcut speculații. Și totuși, *matematica* teoriei lui Dirac a supraviețuit ca o parte esențială a teoriei cuantice a câmpului; ea trebuie predată la fiecare curs avansat de mecanică cuantică. Structura formală a teoriei lui Dirac a supraviețuit deci morții principiilor mecanicii ondulatorii relativiste care l-au condus pe Dirac la teoria lui.

Prin urmare, structurile matematice elaborate de fizicieni în conformitate cu principiile fizice au o stranie adaptabilitate. Ele pot fi transferate dintr-un cadru conceptual în altul și pot servi unor scopuri diferite, la fel ca oasele articulației umărului care la alte animale, precum păsările sau delfinii, constituie legătura între aripă sau aripioară și corp. Suntem călăuziți spre aceste frumoase structuri de principii fizice, dar uneori frumusețea supraviețuiește și atunci când principiile mor.

O posibilă explicație a fost dată de Niels Bohr. În 1922, vorbind despre viitorul primei sale teorii privind structura atomului, el a remarcat că „matematica are doar un număr limitat de forme pe care le putem adapta naturii, și se poate întâmpla să găsești formele corecte pornind de la concepte total greșite“. Bohr a avut dreptate în legătură cu viitorul propriei sale teorii; principiile sale de bază au fost abandonate, dar folosim încă o parte din limbajul și metodele sale de calcul.

Eficiența judecăților estetice e uimitoare mai cu seamă în aplicarea matematicii pure la fizică. A devenit un loc comun faptul că matematicienii sunt călăuziți în munca lor de dorința de a construi formalisme care să fie conceptual frumoase. Matematicianul englez G.H. Hardy spunea că „structurile matematice, la fel ca structurile pictorilor sau poezilor, trebuie să fie frumoase. Ideile, precum culorile sau cuvintele, trebuie să se potrivească într-un mod armonios. Frumusețea este primul test. O matematică urâtă nu poate dăinui.“ Mai mult, deseori se întâmplă ca structurile create de matematicienii aflați în căutarea unei anume frumuseți să devină mai apoi extrem de prețioase pentru fizicieni.

Pentru ilustrare, să ne întoarcem la exemplul geometriei neeuclidiene și al relativității generale. După Euclid, matematicienii au încercat vreme de două milenii să afle dacă diferitele presupuneri aflate la baza geometriei lui Euclid erau independente logic. Dacă postulatele nu erau independente, dacă unele dintre ele puteau fi deduse din altele, atunci se putea renunța la postulatele care nu erau necesare, rezultând o formulare mai economică și deci mai frumoasă a geometriei. Acest efort a ajuns la apogeu în primii ani ai secolului XIX, când „prințul geometrilor“, Carl Friedrich Gauss, și alții au elaborat o geometrie neeuclidiană pentru un tip de spațiu curb care satisfăcea toate postulatele lui Euclid cu excepția celui de-al cincilea. S-a demonstrat astfel că al cincilea postulat al lui Euclid este într-adevăr independent logic de celelalte postulate. Noua geometrie a fost elaborată pentru a lămuri o problemă istorică, nicidecum pentru că cineva s-ar fi gândit că se aplică lumii reale.

Geometria neeuclidiană a fost extinsă în continuare de unul dintre cei mai mari matematicieni, Georg Friedrich Bernhard Riemann, într-o teorie generală a spațiilor curbe cu două, trei sau un număr arbitrar de dimensiuni. Matematicienii au lucrat mai departe la geometria lui Riemann pentru era foarte frumoasă, fără să aibă vreo idee privind aplicațiile ei în fizică. Frumusețea ei a fost, iarăși, în mare măsură, frumusețea inevitabilului. Odată ce începi să te gândești la spațiile curbe, aproape că ești obligat să introduci noțiunile matematice („metrici“, „conexiuni afine“, „tensori de curbura“ și așa mai departe) care sunt ingredientele geometriei lui Riemann. Când Einstein a început să lucreze la relativitatea generală, și-a dat seama că o cale de a-și exprima ideile privind simetria care leagă diferite sisteme de referință era să asocieze gravitației curbura spațiului-timp. El l-a întrebat pe un prieten, Marcel Grossman, dacă exista vreo teorie matematică a spațiilor curbe – nu numai a suprafețelor curbe bidimensionale din spațiul euclidian obișnuit tridimensional. Grossman i-a dat lui Einstein vestea bună că exista într-adevăr un asemenea formalism matematic, cel elaborat de Riemann și de alții, și l-a învățat această matematică, pe care Einstein a înglobat-o apoi în relativitatea generală. Matematica exista, așteptându-l pe Einstein s-o folosească, dar cred că Gauss, Riemann și alți geometri din secolul XIX

nu-și închipuiseră că munca lor va fi vreodată aplicată teoriilor fizice ale gravitației.

Un exemplu încă și mai straniu e oferit de istoria principiilor de simetrie internă. În fizică, principiile de simetrie internă impun de regulă o anume structură de familie în catalogul particulelor posibile. Primul exemplu cunoscut al unei asemenea familii a fost dat de cele două tipuri de particule care alcătuiesc nucleele atomice obișnuite, protonul și neutronul. Protonii și neutronii au aproape aceeași masă, deci, odată descoperit neutronul în 1932 de James Chadwick, a fost firesc să se presupună că forțele nucleare tari (care contribuie la masele neutronilor și protonilor) trebuie să respecte o simetrie simplă: ecuațiile care guvernează aceste forțe trebuie să-și păstreze forma dacă pretutindeni în aceste ecuații rolurile neutronilor și ale protonilor sunt inversate. Între altele, aceasta ne spune că forța nucleară tare între doi neutroni e aceeași ca între doi protoni, dar nu ne spune nimic despre forța dintre un proton și un neutron. A fost deci oarecum surprizătoare descoperirea experimentală din 1936 că forța nucleară dintre doi protoni e aproximativ aceeași ca forța dintre un proton și un neutron. Această observație a făcut să se nască ideea unei simetrii mai profunde decât simpla schimbare a protonilor cu neutronii, o simetrie în raport cu transformarea continuă ce face din protoni și neutroni particule care sunt amestecuri proton-neutron, cu probabilități arbitrare de a fi proton sau neutron.

Aceste transformări de simetrie acționează asupra etichetei particulei care distinge între protoni și neutroni într-un mod care, matematic, este același cu modul în care rotațiile obișnuite din trei dimensiuni acționează asupra spinilor particulelor precum protonii, neutronii sau electronii. Având în minte acest exemplu, până în anii '60 mulți fizicieni presupuneau tacit că transformările de simetrie internă care lasă neschimbate legile naturii trebuie să ia forma rotațiilor într-un spațiu intern cu două, trei sau mai multe dimensiuni, la fel ca rotațiile prin care protonii și neutronii se transformă unii într-alții. Cărțile de matematică despre aplicarea principiilor de simetrie în fizică, disponibile la acea vreme (între care și cele clasice scrise de Hermann Weyl și Eugene Wigner), nu făceau aproape nici o referire la existența altor posibilități

matematice. Abia când au fost descoperite o mulțime de noi particule în razele cosmice, iar apoi în acceleratoare ca Bevatronul de la Berkeley la sfârșitul anilor '50, lumea fizicii teoretice a fost obligată să ia în considerare o gamă mai largă de posibilități pentru simetriile interne. Aceste particule păreau să facă parte din familii mai mari decât simpla pereche de gemeni proton-neutron. De exemplu, s-a găsit că neutronul și protonul se înrudeau îndeaproape cu alte șase particule cunoscute sub numele de hiperioni, având același spin și masă asemănătoare. Ce tip de simetrie internă putea da naștere unor asemenea familii vaste?

Prin anii '60 fizicienii care studiau această problemă au început să caute ajutor în literatura matematică. A fost o surpriză deosebit de plăcută să descopere că într-un fel matematicienii catalogaseră deja toate simetriile posibile. Setul complet al transformărilor care lasă neschimbat orice lucru, fie că este vorba de un obiect anume sau de legile naturii, formează o structură matematică numită *grup*, iar matematica generală a transformărilor de simetrie se numește *teoria grupurilor*. Fiecare grup e caracterizat de reguli matematice abstracte care nu depind de ce anume e transformat, la fel cum regulile aritmeticii nu depind de ce anume adunăm sau înmulțim. Catalogul tipurilor de familii care sunt permise de o simetrie dată a legilor naturii e complet determinat de structura matematică a grupului de simetrie.

Acele grupuri de transformări care acționează în mod continuu, cum sunt rotațiile din spațiul obișnuit sau amestecul de electroni și neutrini din teoria electrolabă, se numesc *grupuri Lie*, după matematicianul norvegian Sophus Lie. Matematicianul francez Élie Cartan a dat în 1894 o listă a tuturor grupurilor Lie „simple“, din care pot fi construite toate celelalte prin combinarea transformărilor lor. În 1960 Gell-Mann și fizicianul israelian Yuval Ne'eman au descoperit în mod independent că unul dintre aceste grupuri Lie simple [(cunoscut sub numele de $SU(3)$] era tocmai cel potrivit pentru a impune puzderiei de particule elementare o structură de familie foarte asemănătoare cu ceea ce se găsisese pe cale experimentală. Gell-Mann a împrumutat un termen din budism și a numit acest principiu de simetrie principiul celor opt căi, fiindcă cele mai cunoscute particule intră în familii de opt membri, cum sunt

neutronul, protonul și cele șase rude ale lor. Nu toate familiile erau pe atunci complete; o nouă particulă era necesară pentru întregirea unei familii de zece particule asemănătoare neutronilor, protonilor și hiperionilor, dar având spinul de trei ori mai mare. Unul din marile succese ale noii simetrii $SU(3)$ a fost descoperirea în 1964 la Brookhaven a acestei particule anticipate, având exact masa prezisă de Gell-Mann.

Această teorie a grupurilor, care s-a dovedit atât de relevantă pentru fizică, fusese inventată însă de matematicieni din motive pur matematice. Teoria grupurilor a fost lansată la începutul secolului XIX de Evariste Galois în demonstrația sa conform căreia nu există formule generale pentru soluțiile anumitor ecuații algebrice (ecuații care implică puteri ale necunoscutelor mai mari sau egale cu cinci). Nici Galois, nici Lie, nici Cartan nu au avut cea mai mică idee despre genul de aplicație pe care teoria grupurilor urma să îl aibă în fizică.

E foarte straniu că matematicienii sunt călăuziți de simțul lor estetic spre elaborarea unor structuri formale pe care fizicienii abia mai târziu le găsesc utile, chiar dacă matematicienii nu s-au gândit vreodată la un asemenea scop. Într-un bine cunoscut eseu, fizicianul Eugene Wigner numește acest fenomen „Eficacitatea Irațională a Matematicii”. În general, fizicienii consideră absolut bizară capacitatea matematicienilor de a anticipa matematica necesară teoriilor fizice. Este ca și cum Neil Armstrong, când a pus prima oară piciorul pe suprafața Lunii în 1969, ar fi găsit în praful selenar urmele pașilor lui Jules Verne.

Atunci de unde provine acel simț al frumosului care îl ajută pe fizician nu numai să descopere teorii despre lumea reală, dar și să judece validitatea teoriilor fizice, uneori în ciuda unor dovezi experimentale contrare? Și cum poate un matematician, condus de simțul său estetic, să ajungă la structuri care se dovedesc valoroase pentru fizicieni abia decenii sau secole mai târziu, chiar dacă matematicianul s-ar putea să nu fie deloc interesat de aplicațiile din fizică?

Cred că există trei explicații plauzibile, dintre care două sunt valabile pentru o mare parte din știință, iar a treia se limitează la fizica fundamentală. Prima explicație este că universul însuși

acționează asupra noastră ca un fel de automat de predare aleator și defectuos, dar eficient pe termen lung. Printr-o serie infinită de evenimente întâmplătoare, atomii de carbon, azot, oxigen și hidrogen s-au unit pentru a constitui forme primitive de viață, care mai târziu au evoluat devenind protozoare, pești și oameni. Într-un mod asemănător, perspectiva noastră asupra universului a evoluat treptat printr-o selecție naturală a ideilor. După nenumărate starturi ratate, ni s-a dovedit că natura e într-un anume fel, iar noi am ajuns să considerăm frumos felul în care e natura.

Bănuiesc că aceasta ar fi cea mai simplă explicație pentru faptul că simțul estetic al antrenorului de cai îl ajută în alegerea calului câștigător. Antrenorul a petrecut ani de-a rândul în hipodrom – a văzut mulți cai câștigând sau pierzând – și a ajuns să asocieze, fără să poată explica, anumite indicii vizuale cu probabilitatea ca un cal să devină câștigător.

Unul dintre lucrurile fascinante în istoria științei e să urmărești educația lentă a speciei noastre în spiritul acelei frumuseți care e de așteptat să fie întâlnită în natură. Mi s-a întâmplat să studiez lucrările din anii '30 despre versiunea inițială a principiului de simetrie internă din fizica nucleară, simetria dintre neutroni și protoni despre care am vorbit mai sus, în încercarea de a găsi articolul care a prezentat pentru prima oară acest principiu de simetrie în felul în care ar fi el prezentat astăzi, ca fapt fundamental și de sine stătător al fizicii nucleare, independent de vreo teorie detaliată a forțelor nucleare. Nu am putut găsi un asemenea articol. Se pare că în anii '30 pur și simplu nu era la modă să scrii articole bazate pe principii de simetrie. La modă era să scrii articole despre forțele nucleare. Dacă s-ar fi dovedit că forțele au o anumită simetrie, cu atât mai bine, fiindcă, odată ce cunoști forța proton-neutron, nu mai trebui să ghicești forța proton-proton. Dar, din câte știu, principiul de simetrie în sine nu era privit ca o trăsătură care legitimează o teorie – o face să fie frumoasă. Principiile de simetrie erau privite ca trucuri matematice; adevărata treabă a fizicienilor era să deducă detaliile dinamice ale forțelor pe care le observau.

Astăzi privim altfel lucrurile. Dacă experimentatorii ar descoperi noi particule care se grupează într-o familie, ceva în genul dubletului proton-neutron, cutiile poștale s-ar umple imediat cu

sute de preprinturi făcând speculații asupra tipului de simetrie ce stă la baza structurii acelei familii, iar dacă s-ar descoperi un nou tip de forță am începe cu toții să emitem ipoteze asupra simetriei care dictează existența acelei forțe. E limpede că am fost transformați de universul ce acționează ca un automat de predare și ne impune un simț al frumosului cu care specia noastră nu s-a născut.

Chiar și matematicienii trăiesc în universul real și reacționează la învățăturile lui. Geometria lui Euclid a fost predată elevilor timp de două milenii ca exemplu aproape ideal de raționament deductiv abstract, dar în acest secol relativitatea generală ne-a învățat că geometria euclidiană se aplică cu succes numai datorită faptului că la suprafața Pământului câmpul gravitațional e destul de slab, așa încât spațiul în care trăim nu are o curbura observabilă. În formularea postulatelor sale, Euclid a acționat de fapt ca un fizician, folosind experiența unei vieți trăite în câmpul gravitațional slab al Alexandriei elenistice pentru a crea o teorie a spațiului necurbat. El nu știa cât de limitată și de conjuncturală era geometria lui. Într-adevăr, doar relativ recent am învățat să facem o deosebire între matematica pură și știința căreia i se aplică. Catedra lucasiană de la Cambridge, deținută de Newton și Dirac, era (și mai este încă) în mod oficial o catedră de matematică, nu de fizică. Abia după apariția unui stil matematic riguros și abstract, odată cu Augustin-Louis Cauchy și alții, la începutul secolului XIX, matematicienii au considerat că e un ideal ca munca lor să fie independentă de experiență și intuiție.

Cel de-al doilea motiv pentru care ne așteptăm ca teoriile științifice de succes să fie frumoase este pur și simplu acela că oamenii de știință tind să aleagă probleme care este probabil să aibă soluții frumoase. Același lucru se aplică și prietenului nostru, antrenorul de cai. El antrenează caii pentru a câștiga curse; a învățat să recunoască acei cai care e probabil să câștige și îi numește cai frumoși; dar, dacă îl iei deoparte, i-ai putea smulge mărturisirea că adevăratul motiv care l-a îndemnat să se apuce să antreneze cai pentru a câștiga curse este că acei cai pe care îi antrenează sunt animale foarte frumoase.

Un bun exemplu din fizică e dat de fenomenul tranzițiilor de fază continue*, cum ar fi dispariția spontană a magnetismului atunci când un magnet permanent de fier este încălzit la o temperatură de 770°C , temperatură numită punctul Curie. Deoarece aceasta e o tranziție continuă, magnetizarea unei bucăți de fier tinde treptat spre zero când temperatura se apropie de punctul Curie. Lucrul surprinzător la asemenea tranziții de fază este *modul* în care magnetizarea tinde spre zero. Estimări ale diferitelor energii dintr-un magnet i-au condus pe fizicieni la presupunerea că, atunci când temperatura este doar cu puțin sub punctul Curie, magnetizarea e proporțională cu rădăcina pătrată a diferenței dintre punctul Curie și temperatură. Experimental s-a observat însă că magnetizarea e proporțională cu puterea 0,37 a acestei diferențe. Dependența magnetizării de temperatură se află deci undeva între proporționalitatea cu rădăcina pătrată (puterea 0,5) și rădăcina cubică (puterea 0,33) a diferenței dintre punctul Curie și temperatură.

Puterile precum 0,37 sunt numite *exponenți critici*, adăugându-li-se uneori adjectivul „neclasici” sau „anomali” fiindcă nu sunt ceea ce ne așteptam fie. S-a observat că și alte mărimi se comportă la fel în această tranziție de fază și în altele, în unele cazuri cu exact aceiași exponenți critici. Fenomenul în sine nu e la fel de spectaculos ca găurile negre sau expansiunea universului, dar unii dintre cei mai străluciți fizicieni teoreticieni ai lumii au abordat problema exponenților critici, până când aceasta a fost rezolvată în cele din urmă în 1972 de Kenneth Wilson și Michael Fisher, ambii pe atunci la Universitatea Cornell. Ne-am putea totuși gândi că un calcul exact al punctului Curie e o problemă de mai mare

* Ceea ce numesc tranziții de fază „continue” poartă adeseori numele de „tranziții de fază de speța a doua”. Aceasta pentru a le distinge de „tranzițiile de fază de speța întâi”, cum ar fi fierberea apei la 100°C sau topirea gheții la 0°C , în care proprietățile materialului se modifică discontinuu. E nevoie de o anumită cantitate de energie (așa-numita căldură latentă) pentru a transforma gheața la 0°C în apă lichidă la aceeași temperatură, sau apa lichidă la 100°C în vapori de apă la aceeași temperatură, dar nu e nevoie de o energie suplimentară pentru a anula magnetismul unei bucăți de fier ajunse exact la temperatura Curie. (N. a.)

importanță practică. Cum se explică atunci că teoreticieni de frunte din fizica stării condensate au acordat problemei exponenților critici o prioritate cu mult mai mare?

Cred că problema exponenților critici a atras atât de mult atenția deoarece fizicienii considerau că e probabil să aibă o soluție frumoasă. Indiciile care sugerau că soluția ar trebui să fie frumoasă erau în primul rând universalitatea fenomenului, faptul că aceiași exponenți critici apăreau în probleme foarte diferite, precum și faptul că fizicienii s-au obișnuit să descopere că proprietățile esențiale ale fenomenelor fizice sunt deseori exprimate prin legi care leagă mărimile fizice de puteri ale altor mărimi, cum e legea inversului pătratului din gravitație. După cum s-a dovedit, teoria exponenților critici are o simplitate și un caracter inevitabil care fac din ea una dintre cele mai frumoase teorii din întreaga fizică. Dimpotrivă, problema calculului exact al temperaturilor tranzițiilor de fază e una încâlcită, soluțiile sale implicând detalii complicate privind fierul sau alte substanțe care suferă tranziții de fază, iar din acest motiv e studiată fie datorită importanței sale practice, fie în lipsa altui lucru mai bun de făcut.

În unele cazuri speranțele inițiale ale oamenilor de știință într-o teorie frumoasă s-au dovedit greșit plasate. Un bun exemplu e dat de codul genetic. În autobiografia sa, Francis Crick arată că, după ce a descoperit împreună cu James Watson structura de spirală dublă a ADN-ului, atenția specialiștilor în biologia moleculară s-a îndreptat spre descifrarea codului prin care celula interpretează șirul de unități chimice de pe cele două spirale ale ADN-ului ca pe o rețetă pentru construirea moleculelor de proteine adecvate. Era cunoscut faptul că proteinele sunt alcătuite din lanțuri de aminoacizi, că există numai douăzeci de aminoacizi importanți în aproape toate plantele și animalele, că informația pentru selectarea fiecărui aminoacid succesiv într-o moleculă de proteină e determinată de alegerea a trei perechi succesive de unități chimice numite baze, care există în doar patru tipuri diferite. Astfel, codul genetic interpretează trei alegeri succesive, fiecare alegere fiind făcută din patru perechi de baze posibile (la fel ca alegerea dintr-un pachet a trei cărți de joc care au numai cele patru culori, nu și numere sau figuri), pentru a comanda fiecare alegere a unuia dintre

cei douăzeci de aminoacizi posibili ce urmează a fi adăugat proteinei. Specialiștii în biologia moleculară au inventat tot felul de principii elegante care ar putea guverna acest cod – de exemplu că nici o informație în alegerea celor trei perechi de baze nu se pierde și că orice informație care nu e necesară specificării unui aminoacid e folosită pentru detectarea erorilor, la fel ca biții suplimentari trimiși între calculatoare pentru a verifica acuratețea transmisiei. Răspunsul găsit la începutul anilor '60 s-a dovedit a fi foarte diferit. Codul genetic e mult mai încâlcit; unii aminoacizi sunt codificați de mai multe triplete de perechi de baze, iar alte triplete nu codifică nimic. Codul genetic nu e chiar un cod ales la întâmplare, ceea ce sugerează că a fost oarecum îmbunătățit prin evoluție, dar orice specialist în comunicații ar putea proiecta un cod mai bun. Motivul este desigur faptul că acest cod *nu* a fost proiectat; el s-a dezvoltat printr-o serie de accidente la începutul vieții pe Pământ și a fost moștenit mai mult sau mai puțin sub această formă de toate organismele ulterioare. Evident, codul genetic este atât de important încât trebuie studiat indiferent dacă e frumos sau nu, dar suntem puțin dezamăgiți că nu s-a dovedit a fi frumos.

Uneori, când simțul estetic nu ne ajută, aceasta se întâmplă deoarece am supraestimat caracterul fundamental a ceea ce încercăm să explicăm. Un exemplu faimos îl reprezintă cercetările tânărului Johannes Kepler asupra dimensiunilor orbitelor planetare.

Kepler cunoștea una dintre cele mai frumoase concluzii ale matematicii grecești privind ceea ce numim solidele platoniciene. Acestea sunt obiecte tridimensionale cu fețe plane, pentru care fiecare vârf, față sau muchie este exact la fel cu celelalte vârfuri, fețe sau muchii. Un exemplu evident este cubul. Grecii au descoperit că nu există decât cinci solide platoniciene: cubul, piramida triunghiulară, dodecaedrul cu douăsprezece fețe, octaedrul cu opt fețe și icosaedrul cu douăzeci de fețe. (Ele se numesc solide platoniciene deoarece în *Timaios* Platon propunea o corespondență biunivocă între acestea și cele cinci presupuse elemente, idee atacată mai târziu de Aristotel.) Solidele platoniciene oferă un minunat exemplu de frumusețe matematică, același gen de frumusețe ca și catalogul Cartan al tuturor principiilor posibile de simetrie continuă.

În *Mysterium cosmographicum*, Kepler lansa ideea că existența a numai cinci solide platoniciene explică de ce există numai cinci planete (cu excepția Pământului): Mercur, Venus, Marte, Jupiter și Saturn. (Uranus, Neptun și Pluto au fost descoperite mai târziu.) Kepler asocia fiecareia dintre aceste cinci planete câte un solid platonician și credea că raza orbitei fiecărei planete era proporțională cu raza solidului platonician corespunzător, dacă solidele sunt așezate unul într-altul în ordinea corectă. Kepler a spus că s-a luptat mult cu neregularitățile mișcărilor planetare „până când, în cele din urmă, ele s-au supus legilor naturii“.

Pentru omul de știință contemporan poate părea scandalos faptul că unul dintre fondatorii științei moderne a inventat un asemenea model fantezist al sistemului solar. Aceasta nu atât fiindcă schema lui Kepler nu se potrivea cu observațiile asupra sistemului solar, ci mai cu seamă fiindcă știm că acesta nu e genul de speculații potrivite sistemului solar. Dar Kepler nu era un prost. Tipul de raționament speculativ pe care l-a aplicat sistemului solar seamănă foarte bine cu teoretizările din fizica particulelor elementare de azi; noi nu asociem nimic cu solidele platoniciene, dar credem de pildă în corespondența dintre diversele tipuri posibile de forță și diverșii membri ai catalogului Cartan conținând toate simetriile posibile. Kepler nu a greșit când a folosit acest gen de speculație, ci atunci când a presupus (la fel ca mulți filozofi înaintea lui) că planetele sunt importante.

Desigur, planetele sunt importante într-un anumit fel. Noi trăim pe una din ele. Dar existența lor nu e încorporată în nici o lege a naturii la nivel fundamental. Acum înțelegem că planetele și orbitele lor sunt rezultatul unui șir de accidente istorice și că, deși fizica ne poate spune care orbite sunt stabile și care haotice, nu avem nici un motiv să ne așteptăm ca vreo relație între dimensiunile orbitelor să fie matematic simplă și frumoasă.

Numai dacă studiem probleme cu adevărat fundamentale ne așteptăm să găsim răspunsuri frumoase. Noi credem că, dacă ne întrebăm de ce lumea este așa cum este și dacă ne întrebăm apoi de ce răspunsul este așa cum este, la capătul acestui șir de explicații vom găsi câteva principii simple de o mare frumusețe. Credem acest lucru în parte fiindcă experiența noastră istorică ne arată că

pe măsură ce căutăm mai adânc găsim tot mai multă frumusețe. Platon și neoplatonicienii ne-au învățat că frumusețea pe care o vedem în natură este o reflectare a frumuseții ultime, acel *nous* [spiritul, intelectul]. Pentru noi, frumusețea actualelor teorii este o anticipare, o premoniție a frumuseții teoriei finale. Și, în orice caz, nu am accepta drept teorie finală nici o teorie care nu ar fi frumoasă.

Deși nu știm deocamdată cu precizie unde anume în munca noastră trebuie să ne bazăm pe simțul estetic, în fizica particulelor elementare judecățile estetice par să funcționeze din ce în ce mai bine. Iau aceasta drept dovadă că ne îndreptăm în direcția bună, și poate că nu suntem prea departe de scopul nostru.

CAPITOLUL VII

Împotriva filozofiei

*Când eram tânăr frecventam cu zel
Doctor și Sfânt, și-am auzit discuții aprinse
fel și fel: dar mereu am ieșit
Pe-aceeasi ușă pe unde am venit.*

EDWARD FITZGERALD, *Rubáiyát of Omar Khayyám*

Fizicienii s-au sprijinit atât de mult pe judecăți estetice subiective și adesea vagi, încât ar fi de așteptat să se sprijine și pe filozofie, din care la urma urmei a apărut știința însăși. Ne poate oare călăuzi filozofia spre o teorie finală?

Importanța filozofiei pentru fizică în zilele noastre mi se pare că seamănă întrucâtva cu importanța pe care au avut-o vechile state naționale pentru popoarele lor. Nu exagerăm prea mult dacă spunem că, până la introducerea serviciilor poștale, misiunea principală a statelor naționale a fost să-și protejeze popoarele de alte state naționale. Intuițiile filozofilor au adus din când în când beneficii fizicienilor, dar în genere prin negare – protejându-i de prejudecățile altor filozofi.

Nu vreau să trag de aici concluzia că lucrul cel mai bun pentru fizică e eliminarea tuturor ideilor preconceptuate. În fiecare moment există atâtea lucruri care pot fi făcute, atâtea principii acceptate care pot fi contestate, încât dacă nu suntem cât de cât călăuziți de ideile noastre preconceptuate nu suntem în stare să facem absolut nimic. Problema e că în general principiile filozofice nu ne-au oferit ideile preconceptuate de care aveam nevoie. Pornind la vânătoare după teoria finală, fizicienii seamănă mai curând cu copoi decât cu șoimii; am învățat să adulmecăm de jur împrejur urmele frumuseții pe care ne așteptăm s-o aibă legile naturii, dar nu părem a fi în stare să vedem calea spre adevăr de la înălțimile filozofiei.

Fizicienii se folosesc, desigur, de o anume filozofie practică. Pentru cei mai mulți dintre noi este un realism brutal și eficient, o credință în realitatea obiectivă a ingredientelor din teoriile noastre științifice. Dar am ajuns la ea prin experiența cercetării științifice și doar rareori prin învățăturile filozofilor.

Nu vreau să neg orice valoare filozofiei, care în cea mai mare parte nu are legătură cu știința. Nici măcar nu vreau să neg orice valoare filozofiei științei, care în cel mai fericit caz mi se pare un comentariu agreabil despre istoria și descoperirile științei. Dar nici nu trebuie să ne așteptăm ca ea să ofere oamenilor de știință din zilele noastre o îndrumare utilă privind calea de urmat în cercetare sau rezultatele la care e probabil să ajungă.

Trebuie să recunosc că mulți filozofi văd lucrurile la fel. După ce a studiat lucrări de filozofia științei scrise de-a lungul a trei decenii, filozoful George Gale a tras concluzia că „aceste discuții aproape ezoterice, la limita scolasticului, ar putea interesa doar un număr foarte mic de oameni de știință activi“. Wittgenstein remarcă: „Mi se pare extrem de improbabil ca un om de știință sau un matematician care mă citesc să fie serios influențati în munca lor.“

Nu e vorba aici doar de lenea intelectuală a omului de știință. E cumplit să fii obligat să-ți întrerupi munca pentru a învăța o nouă disciplină, dar oamenii de știință o fac atunci când e cazul. În diferite momente m-am abătut de la munca mea pentru a învăța tot felul de lucruri pe care aveam nevoie să le cunosc, de la topologia diferențială până la Microsoft DOS. Problema e că o cunoaștere a filozofiei nu pare a fi utilă fizicienilor – în afara cazului în care lucrările unor filozofi ne ajută să evităm erorile altor filozofi.

Trebuie să recunosc că aceste judecăți poartă amprenta limitelor și subiectivității mele. După câțiva ani de entuziasm pentru filozofie pe vremea studenției, am devenit sceptic. Ideile filozofilor pe care i-am studiat păreau obscure și insignifiante în raport cu succesele uimitoare ale fizicii și matematicii. Din când în când, am încercat să citesc lucrări de filozofia științei. Unele dintre ele erau scrise într-un jargon atât de impenetrabil, încât nu pot să cred decât că erau menite să-i impresioneze pe cei ce confundă obscuritatea cu profunzimea. Unele dintre ele erau bine scrise și chiar pline de spirit, cum ar fi scrierile lui Wittgenstein și Paul Feyerabend.

Dar rareori mi s-a părut că au vreo legătură cu cercetarea științifică așa cum o cunosc eu. După Feyerabend, noțiunea de explicație științifică în accepțiunea unor filozofi ai științei e atât de îngustă încât este imposibil să spui că o teorie e explicată prin alta, perspectivă care ar lăsa șomeră întreaga mea generație de fizicieni ai particulelor elementare.

Cititorul și-ar putea spune (mai ales dacă e filozof de meserie) că un om de știință atât de insensibil la filozofia științei ca mine ar trebui să părăsească tiptil subiectul și să-l lase în seama specialiștilor. Știu ce părere au filozofii despre încercările oamenilor de știință de a deveni filozofi amatori. Dar n-am de gând să joc aici rolul unui filozof, ci pe cel al unui exemplu, un om de știință îndărătnic care nu găsește nici un ajutor la filozofii profesioniști. Nu sunt singurul în această situație; nu cunosc pe *nimeni* dintre participanții activi la progresul fizicii în perioada postbelică ale cărui cercetări să fi fost semnificativ influențate de lucrările filozofilor. În capitolul precedent am vorbit despre ceea ce Wigner numește „eficacitatea irațională” a matematicii; vreau să prezint aici un fenomen la fel de uimitor, iraționala ineficacitate a filozofiei.

Chiar dacă doctrinele filozofice au fost în trecut utile oamenilor de știință, ele au dăinuit în general prea mult, făcând mai mult rău decât bine. Să luăm spre exemplu venerabila doctrină „mecanicistă”, ideea că natura acționează prin atracția și respingerea particulelor materiale sau a fluidelor. În lumea antică nici o doctrină nu putea fi mai avansată. De când filozofii presocratici Leucip și Democrit au început să vorbească despre atomi, ideea că fenomenele naturale au cauze mecanice s-a opus credinței populare în zei și demoni. Epicur, figură centrală a culturii elenistice, a adoptat o perspectivă mecanicistă ca antidot împotriva credinței în zeii olimpieni. Pe la 1630, când René Descartes a pornit în marea sa încercare de a înțelege lumea în termeni raționali, era normal ca el să descrie forțele fizice precum gravitația într-un mod mecanicist, făcând apel la vârtejuri ale unui material fluid ce umple întreg spațiul. „Filozofia mecanicistă” a lui Descartes a avut o puternică influență asupra lui Newton nu fiindcă ar fi fost corectă (Descartes părea să nu cunoască ideea modernă de testare cantitativă a teoriilor), ci fiindcă oferea un exemplu de teorie

mecanicistă care ar fi putut explica natura. Mecanicismul și-a atins apogeul în secolul XIX, odată cu strălucita explicare a chimiei și căldurii prin atomi. Chiar și în zilele noastre mecanicismul apare multora drept opusul logic al superstițiilor. În istoria gândirii umane, perspectiva mecanicistă asupra lumii a jucat un rol eroic.

Dar tocmai asta e problema. În știință, ca și în politică sau economie, suntem amenințați de ideile eroice care au supraviețuit utilității lor. Trecutul eroic al mecanicismului i-a dat un asemenea prestigiu încât urmașii lui Descartes au acceptat cu greu teoria newtoniană a sistemului solar. Cum ar putea un bun cartezian, convins că toate fenomenele naturale pot fi reduse la impactul reciproc al corpurilor sau fluidelor materiale, să accepte punctul de vedere al lui Newton conform căruia Soarele exercită o forță asupra Pământului de-a lungul a 93 de milioane de mile de spațiu vid? Abia în secolul al XVIII-lea filozofii continentali au început să accepte ideea de acțiune la distanță. În cele din urmă, după 1720, ideile lui Newton au avut câștig de cauză pe continent la fel ca în Marea Britanie: în Olanda, Italia, Franța și Germania (în această ordine) – fapt datorat în parte influenței unor filozofi precum Voltaire și Kant. Dar, din nou, filozofia a ajutat prin negare – a contribuit doar la eliberarea științei de constrângerile filozofiei înseși.

Chiar și după triumful newtonismului, tradiția mecanicistă a continuat să înflorească în fizică. Teoriile câmpurilor electrice și magnetice, elaborate în secolul XIX de Michael Faraday și James Clerk Maxwell, erau formulate într-un cadru mecanicist, prin tensiuni într-un mediu fizic ubicuu numit deseori eter. Fizicienii secolului XIX nu se comportau prostește – toți fizicienii au nevoie de o perspectivă provizorie asupra lumii pentru a progresa, iar perspectiva mecanicistă părea un candidat la fel de bun ca oricare altul. Numai că a supraviețuit prea mult.

Ruptura totală a teoriei electromagnetice de mecanicism a avut loc în 1905, când teoria specială a relativității a lui Einstein a spulberat pur și simplu eterul și l-a înlocuit cu spațiul vid ca mediu în care se propagă impulsurile electromagnetice. Dar chiar și după aceea perspectiva mecanicistă a dăinuit printre fizicienii generației mai vârstnice, precum personajul profesorului Victor Jakob din pătrunzătorul roman al lui Russel McCormach *Cugetările*

nocturne ale unui fizician clasicist, care era incapabil să absoarbă noile idei.

Mecanicismul s-a propagat și dincolo de frontierele științei și a supraviețuit acolo, punând mai târziu probleme oamenilor de știință. În secolul XIX tradiția eroică a mecanicismului a fost încorporată din nefericire în materialismul dialectic al lui Marx, Engels și al urmașilor lor. În 1908, Lenin, aflat în exil, a scris o carte pompoasă despre materialism și, chiar dacă pentru el a reprezentat mai curând un mijloc de a-i ataca pe alți revoluționari, fragmente din comentariile lui au fost transformate în literă de evanghelie de urmașii săi, iar o vreme materialismul dialectic a constituit o piedică în calea acceptării relativității generale în Uniunea Sovietică. Chiar și în 1961 distinsul fizician rus Vladimir Fock s-a văzut nevoit să se apere de acuzația că s-ar fi abătut de la ortodoxia filozofică. Prefața la tratatul său *Teoria spațiului, timpului și gravitației* conține o afirmație remarcabilă: „Latura filozofică a perspectivei noastre asupra teoriei spațiului, timpului și gravitației s-a format sub influența filozofiei materialismului dialectic, în special sub influența lucrării lui Lenin *Materialism și empiriocriticism*.“*

Nimic nu e simplu în istoria științei. Deși după Einstein în cercetarea științifică seriosă nu mai era loc pentru vechea și naiva perspectivă mecanicistă, unele dintre elementele ei au supraviețuit în fizica primei jumătăți a secolului XX. Pe de o parte erau particulele materiale, precum electronii, protonii și neutronii care alcătuiesc materia obișnuită. Pe de altă parte erau câmpurile, cum sunt câmpurile electric, magnetic și gravitațional, produse de particule și care exercită forțe asupra particulelor. Apoi, din 1929, fizica a început să se îndrepte spre o perspectivă mai unitară. Werner Heisenberg și Wolfgang Pauli au descris atât particulele, cât și forțele ca manifestări ale unui nivel mai profund al realității, nivelul câmpurilor cuantice. Mecanica cuantică fusese aplicată cu câțiva

* „Ghinionul“ relativității în Uniunea Sovietică a fost că Lenin, din motive conjunctural-ideologice, îl atacase dur pe Mach, iar Einstein a afirmat de mai multe ori că ideile lui Mach i-au deschis calea spre relativitatea generală. (N. red.)

ani în urmă câmpurilor electric și magnetic și fusese folosită pentru a justifica ideea de particulă de lumină (foton) introdusă de Einstein. Acum Heisenberg și Pauli au emis ipoteza că nu numai fotonii, ci toate particulele sunt pachete de energie în diferite câmpuri. În această *teorie cuantică a câmpului* electronii sunt pachete de energie ale câmpului electronic, neutrinii sunt pachete de energie ale câmpului neutrinic și așa mai departe.

În ciuda acestei uimitoare sinteze, multe dintre cercetările despre fotoni și electroni din anii '30 și '40 au fost făcute în cadrul vechii electrodinamici cuantice dualiste, în care fotonii erau considerați pachete de energie ale câmpului electromagnetic, iar electronii simple particule materiale. Dacă se au în vedere doar electronii și fotonii, rezultatele sunt aceleași ca în teoria cuantică a câmpului. În anii '50 însă, pe când eram student, devenise aproape unanim acceptat faptul că teoria cuantică a câmpului era cadrul potrivit pentru fizica fundamentală. În rețeta fizicienilor pentru alcătuirea lumii, lista ingredientilor nu mai conținea particule, ci doar câteva tipuri de câmpuri.

Din această poveste putem trage concluzia că ne-am hazarda dacă am presupune că cunoaștem chiar și termenii în care o viitoare teorie finală va fi formulată. Richard Feynman se plânga cândva că jurnaliștii pun întrebări privind viitoarele teorii vorbind despre particulele materiale ultime sau unificarea finală a tuturor forțelor, când de fapt habar n-avem dacă acestea sunt întrebările potrivite. Pare improbabil ca vechea și naiva viziune mecanicistă asupra lumii să fie înviată sau că va trebui să ne întoarcem la un dualism al particulelor și câmpurilor, dar nici măcar teoria cuantică a câmpului nu e sigură. Aducerea gravitației în cadrul teoriei cuantice a câmpului întâmpină mari dificultăți. În efortul de a depăși aceste dificultăți a apărut recent un candidat pentru teoria finală în care chiar câmpurile cuantice sunt doar manifestări la energii joase ale unor neregularități din spațiul-timp, numite corzi. E puțin probabil să cunoaștem întrebările potrivite înainte de a ne apropia de răspunsurile lor.

Deși mecanicismul naiv pare mort și îngropat, fizica continuă să fie afectată de alte presupuneri metafizice, mai ales cele legate de spațiu și timp. Durata în timp este singurul lucru pe care îl putem

măsura (chiar dacă imprecis) doar prin gândire, fără semnale din partea simțurilor noastre, așa încât e firesc să ne închipuim că putem afla ceva despre dimensiunea timpului prin rațiune pură. Kant spunea că spațiul și timpul nu fac parte din realitatea exterioară, ci sunt structuri preexistente în mințile noastre care ne permit să facem legătura între obiecte și evenimente. Pentru un kantian, cel mai șocant lucru la teoriile lui Einstein era că ele retrogradau spațiul și timpul la statutul de simple aspecte ale universului fizic, aspecte ce pot fi afectate de mișcare (în relativitatea specială) sau gravitație (în relativitatea generală). Chiar și acum, la un secol de la apariția relativității speciale, unii fizicieni încă mai cred că există lucruri care pot fi spuse despre spațiu și timp pe baza gândirii pure.

Această metafizică intransigentă iese la iveală mai ales în discuțiile despre originea universului. Conform teoriei big bang standard, universul și-a început existența într-un moment de temperatură și densitate infinite, în urmă cu zece-cincisprezece miliarde de ani. De fiecare dată când țineam o prelegere despre teoria big bang, cineva din public îmi spunea că ideea de început e absurdă; orice moment am considera pentru începutul big bang-ului, trebuie să fi existat un moment înaintea lui. Am încercat să explic că nu e neapărat așa. E adevărat, de pildă, că experiența noastră curentă ne spune că, oricât de frig ar fi, e mereu posibil să se facă și mai frig, dar există ceea ce noi numim zero absolut; nu putem atinge temperaturi sub zero absolut nu fiindcă nu am fi suficient de deștepți, ci fiindcă temperaturi sub zero absolut n-au pur și simplu nici un sens. Stephen Hawking a oferit o analogie și mai bună: are sens să ne întrebăm ce e la nord de Austin sau de Cambridge sau de oricare alt oraș, dar nu are sens să ne întrebăm ce e la nord de Polul Nord. Cu această problemă s-a confruntat și Sfântul Augustin în *Confesiunile* sale, ajungând la concluzia că e greșit să te întrebi ce a fost înainte ca Dumnezeu să creeze universul, deoarece Dumnezeu, care e în afara timpului, a creat timpul odată cu universul. Același lucru susținea și Moise Maimonide.

Ar trebui să recunosc aici că de fapt nu știm dacă universul chiar a început la un anumit moment din trecut. Andrei Linde și alți cosmologi au prezentat recent teorii plauzibile care descriu

universul actual aflat în expansiune ca pe o mică bulă dintr-un megaunivers infinit de bătrân, în care asemenea bule apar mereu și dau naștere la noi bule. Nu vreau să spun că universul are indubitabil o vârstă finită, ci doar că nu poți susține contrariul pe baza gândirii pure.

Încă o dată, nici măcar nu știm dacă punem întrebările potrivite. În cea mai recentă versiune a teoriei corzilor, spațiul și timpul apar ca mărimi derivate, care nu există în ecuațiile fundamentale ale teoriei. În asemenea teorii spațiul și timpul au numai o semnificație aproximativă; nu are sens să vorbești despre un moment de timp mai apropiat de big bang decât o milionime de bilionime de bilionime de bilionime de secundă. În viața noastră de zi cu zi abia dacă putem observa un interval de o sutime de secundă, așa încât ceritudinile intuitive despre natura timpului și spațiului derivate din experiența noastră cotidiană nu ne sunt de prea mare folos în încercarea de a elabora o teorie a originii universului.

Nu metafizica creează fizicii moderne cele mai mari necazuri, ci epistemologia, studiul naturii și surselor cunoașterii. Doctrina epistemologică a pozitivismului (sau, în unele versiuni, pozitivismul logic) cere nu numai ca știința să-și testeze în cele din urmă teoriile prin observații (afirmație greu de contrazis), dar și ca fiecare aspect al teoriilor noastre să se refere în fiecare punct la mărimi observabile. Altfel spus, deși teoriile fizice pot implica aspecte care nu au fost încă studiate observațional și e prea costisitor să fie studiate anul acesta sau la anul, e inadmisibil ca teoriile noastre să opereze cu elemente care în principiu nu pot fi niciodată observate. Miza e foarte mare, fiindcă pozitivismul, admitând că e valabil, ne-ar permite să descoperim indicii prețioase privind ingredientele teoriei finale făcând apel la experimente mintale pentru a vedea care sunt acele lucruri ce pot fi în principiu observate.

Figura cel mai des asociată cu introducerea pozitivismului în fizică este Ernst Mach, fizician și filozof din Viena sfârșitului de secol XIX, care s-a folosit în mare măsură de pozitivism ca antidot la metafizica lui Immanuel Kant. Articolul lui Einstein din 1905 despre relativitatea specială e marcat de evidenta influență a lui Mach – apar mereu observatori care măsoară distanțe și timpi cu rigle, ceasornice și raze de lumină. Pozitivismul l-a ajutat pe

Einstein să se elibereze de ideea că există o semnificație absolută în afirmația că două evenimente sunt simultane; el a descoperit că nici o măsurătoare nu poate oferi un criteriu pentru simultaneitate care să dea același rezultat pentru toți observatorii. Această preocupare pentru ceea ce poate fi în realitate observat e esența pozitivismului. Einstein a recunoscut că îi e îndatorat lui Mach; într-o scrisoare adresată acestuia câțiva ani mai târziu, el s-a numit pe sine „devotatul dumneavoastră discipol“. După Primul Război Mondial, pozitivismul a fost dezvoltat în continuare de Rudolf Carnap și filozofii Cercului de la Viena, care își propuneau reconstrucția științei în conformitate cu principii filozofice acceptabile, și au reușit într-adevăr să înlăture mult balast metafizic.

Pozitivismul a jucat un rol important și în nașterea mecanicii cuantice moderne. Primul articol important al lui Heisenberg din 1925 despre mecanica cuantică începe cu observația că „este bine cunoscut faptul că regulile formale folosite [în teoria cuantică din 1913 a lui Bohr] la calculul mărimilor observabile cum ar fi energia atomului de hidrogen pot fi serios criticate pe motiv că ele conțin, ca elemente de bază, relații între mărimi care par să fie în principiu neobservabile, de exemplu poziția și viteza de rotație a electronului“. În spiritul pozitivismului, Heisenberg a acceptat în versiunea dată de el mecanicii cuantice doar observabile, cum ar fi ratele cu care un atom poate suferi în mod spontan o tranziție de la o stare la alta prin emisia unei cuante de radiație. Principiul de incertitudine, unul din stâlpii de susținere ai interpretării probabilistice a mecanicii cuantice, se bazează pe analiza pozitivistă a lui Heisenberg privind limitările cu care suntem confrunțați când încercăm să observăm poziția și impulsul unei particule.

În ciuda importanței lui pentru Einstein și Heisenberg, pozitivismul a făcut tot atâta rău, cât și bine. Dar, spre deosebire de perspectiva mecanicistă, pozitivismul și-a păstrat aura eroică, așa încât supraviețuiește pentru a-și continua acțiunea nefastă. George Gale învinuiește chiar pozitivismul de multe dintre actualele rupturi între fizicieni și filozofi.

Pozitivismul a stat la baza opoziției față de teoria atomică de la începutul secolului XX. Secolul XIX adusese o minunată rafinare a vechii idei a lui Democrit și Leucip că întreaga materie e alcătuită

din atomi, iar teoria atomică fusese folosită de John Dalton, Amadeo Avogadro și succesorii lor pentru a explica regulile chimiei, proprietățile gazelor și natura căldurii. Teoria atomică devenise parte a limbajului curent în fizică și chimie. Cu toate acestea, urmașii pozitiviști ai lui Mach au privit-o ca pe o abatere de la metodele corecte ale științei, fiindcă acești atomi nu puteau fi observați prin nici o tehnică imaginabilă pe atunci. Pozitiviștii au decretat că oamenii de știință ar trebui numai să prezinte rezultatele observațiilor, de pildă faptul că 2 volume de hidrogen se combină cu 1 volum de oxigen pentru a rezulta vapori de apă, dar nu ar trebui să facă speculații metafizice cum că aceasta s-ar datora faptului că molecula de apă e alcătuită din doi atomi de hidrogen și un atom de oxigen, fiindcă ei nu pot observa acești atomi și aceste molecule. Mach însuși nu s-a împăcat niciodată cu existența atomilor. Chiar și în 1910, după ce atomismul fusese acceptat de aproape toată lumea, într-o dispută cu Planck, Mach îi scria acestuia: „Dacă e atât de important să crezi în realitatea atomilor, atunci eu încetez să urmez modul de gândire al fizicii. Nu voi fi un fizician de meserie și renunț la reputația mea științifică.”

Rezistența față de atomism a avut un efect cât se poate de nefericit prin întârzierea acceptării mecanicii statistice, teoria reduționistă care interpretează căldura în termenii distribuției statistice a energiilor părților componente ale oricărui sistem. Dezvoltarea acestei teorii prin cercetările lui Maxwell, Boltzmann, Gibbs și alții a fost unul dintre triumfurile științei secolului XIX, iar respingând-o, pozitiviștii au săvârșit cea mai gravă greșală pe care un om de știință o poate face: să nu recunoști succesul atunci când el apare.

Pozitivismul a adus și alte prejudicii, mai puțin cunoscute. În 1897, J.J. Thomson a efectuat un experiment celebru, în general considerat ca momentul descoperirii electronului. (Thomson a fost succesorul lui Maxwell și Rayleigh, având titlul de Profesor Cavendish la Cambridge.) De câțiva ani fizicienii erau derutați de misteriosul fenomen al razelor catodice, raze emise atunci când o placă metalică dintr-un tub de sticlă vidat e conectată la borna negativă a unei baterii electrice puternice, și care își manifestă prezența printr-o pată luminoasă în locul unde razele lovesc capătul opus al tubului de sticlă. Ecranele televizoarelor moderne nu sunt

decât tuburi catodice în care intensitatea razelor este controlată de semnalele transmise de stațiile de televiziune. Când razele catodice au fost descoperite în secolul XIX, nimeni nu știa la început ce erau. Apoi Thomson a măsurat devierea razelor catodice în câmpuri electrice și magnetice la trecerea lor prin tubul vidat. A rezultat că valoarea devierii acestor raze era în acord cu ipoteza că ele sunt alcătuite din particule având o anumită sarcină electrică și o anumită masă, aflate mereu în același raport. Deoarece masa acestor particule s-a dovedit a fi mult mai mică decât masa atomilor, Thomson a tras concluzia că aceste particule sunt constituenții fundamentali ai atomilor și purtătorii de sarcină electrică din toți curenții electrici, din cabluri și din atomi, precum și din tuburile catodice. Pentru acest motiv, Thomson s-a considerat, și a fost considerat de toți istoricii științei, descoperitorul unei noi forme de materie, o particulă pentru care a ales un nume deja cunoscut în teoria electrolizei: electronul.

Același experiment a fost efectuat la Berlin de Walter Kaufmann, aproximativ în același timp. Principala deosebire dintre experimentul lui Kaufmann și cel al lui Thomson a fost aceea că primul a fost mai bun. Kaufmann a dat un rezultat mai precis pentru raportul dintre sarcina și masa electronului decât Thomson. Dar Kaufmann nu apare nicăieri citat drept descoperitorul electronului fiindcă nu s-a gândit că descoperise o nouă particulă. Thomson se înscria într-o tradiție britanică, avându-i ca înaintași pe Newton, Dalton și Prout — tradiție a ipotezelor privind atomii și constituenții lor. Kaufmann însă era pozitivist; el credea că fizicienii nu trebuie să facă speculații asupra unor lucruri pe care nu le pot observa. Prin urmare, Kaufmann nu a anunțat că descoperise un nou tip de particulă, ci doar că indiferent ce anume circulă într-o rază catodică are un anumit raport între sarcina electrică și masă.

Morala acestei povești nu e doar că pozitivismul a fost dăunător pentru cariera lui Kaufmann. Thomson, călăuzit de convingerea că descoperise o particulă fundamentală, a mers mai departe și a făcut și alte experimente pentru a-i explora proprietățile. El a găsit dovada existenței unor particule, având același raport între masă și sarcină, emise în radioactivitate și de metale încinse, și a efectuat o primă măsurătoare a sarcinii electrice a electronului. Această

măsurătoare, împreună cu măsurătorile anterioare ale raportului între sarcină și masă au oferit o valoare pentru masa electronului. Totalitatea acestor experimente este cea care îndreptățește cu adevărat pretenția lui Thomson de a fi descoperitorul electronului, dar probabil că el nu le-ar fi efectuat niciodată dacă nu ar fi vrut să ia în serios ideea unei particule care în acel moment nu putea fi observată direct.

Pozitivismul lui Kaufmann și al adversarilor atomismului ne apare azi nu numai obstructionist, ci și naiv. Ce înseamnă în fond a observa ceva? Riguros vorbind, Kaufmann nici măcar nu a observat devierea razelor catodice într-un câmp magnetic dat; el a măsurat poziția unei pete luminoase la capătul opus al unui tub vidat când erau înfășurate fire de un anumit număr de ori în jurul unei bucați de fier din apropierea tubului și când acestea erau conectate la o anumită baterie electrică, și a folosit o teorie acceptată pentru a interpreta acest fapt în termeni de traiectorii ale razelor și câmpuri magnetice. Foarte riguros vorbind, nu a făcut nici măcar asta: el a avut anumite senzații vizuale și tactile pe care le-a interpretat în termeni de pete luminoase, fire și baterii. A devenit un loc comun pentru istoricii științei faptul că observația nu se poate niciodată elibera de teorie.

Capitularea finală a antiatomiștilor se consideră în general a fi o afirmație făcută de chimistul Wilhelm Ostwald în ediția din 1908 a cărții sale *Principiile generale ale chimiei*: „Sunt convins acum că am intrat recent în posesia dovezilor experimentale privind natura discontinuă sau granulară a materiei pe care ipoteza atomică le-a căutat în zadar vreme de sute și mii de ani.” Dovezile experimentale la care se referea Ostwald constau în măsurători ale impacturilor moleculare în așa-numita mișcare browniană a particulelor minuscule aflate în suspensie în lichide și măsurarea sarcinii electronului de către Thomson. Dar dacă se poate înțelege ce încărcătură teoretică au toate datele experimentale, devine limpede că toate succesele teoriei atomice în chimie și în mecanica statistică reprezentaseră încă din secolul XIX o observare a atomilor.*

* O relatare amplă privind disputa în jurul ipotezei atomice și experimentele cruciale de la începutul secolului XX se găsește într-o altă carte a lui Steven Weinberg, *Descoperirea particulelor subatomice* (Humanitas, 2007). (N. red.)

Heisenberg însuși consemnează că Einstein și-a revizuit ideile despre pozitivismul primei sale abordări a relativității. Într-o prelegere din 1974, Heisenberg își amintea o conversație avută cu Einstein la Berlin la începutul lui 1926:

I-am spus [lui Einstein] că nu putem de fapt observa o asemenea traiectorie [a electronului în atom]; ce putem înregistra efectiv sunt frecvențele luminii radiate de atom, intensitățile și probabilitățile de tranziție, dar nu o traiectorie reală. Și din moment ce e cât se poate de rațional să introducem într-o teorie doar mărimi care pot fi observate direct, noțiunea de traiectorie a electronului nu ar trebui de fapt să apară în teorie. Spre surprinderea mea, Einstein nu a fost deloc mulțumit de acest argument. El credea că orice teorie conține în realitate mărimi neobservabile. Principiul de a folosi doar mărimi observabile pur și simplu nu poate fi urmat cu consecvență. Iar când am obiectat spunând că nu făcusem decât să aplic acel tip de filozofie pe care la rândul lui îl așezase la baza teoriei relativității restrânse, mi-a răspuns simplu: „Poate că am folosit o asemenea filozofie mai demult, și am făcut-o și în scris, dar e oricum absurdă.“

Încă înainte de acest moment, în 1922, într-o conferință ținută la Paris, Einstein îl considera pe Mach „un bon mécanicien“, dar un „deplorable philosophe“.

În ciuda victoriei atomismului și a dezertării lui Einstein, tema pozitivismului a continuat să-și facă din când în când simțită prezența în fizica secolului XX. Concentrarea pozitivistă asupra observabilelor precum pozițiile și impulsurile particulelor a stat în calea unei interpretări „realiste“ a mecanicii cuantice, în care funcția de undă e o reprezentare a realității fizice. Pozitivismul a jucat de asemenea un rol în complicarea problemei infiniților. După cum am văzut, în 1930 Oppenheimer a observat că teoria fotonilor și electronilor, numită electrodinamică cuantică, conducea la un rezultat absurd: emisia și absorbția fotonilor de către un electron dintr-un atom ar da atomului o energie infinită. Problema infiniților i-a preocupat pe teoreticieni în anii '30 și '40 și a condus la presupunerea generală că electrodinamica cuantică devine pur și simplu inaplicabilă la electronii și fotonii de energie foarte înaltă. Mare parte din angoasa generată de electrodinamica cuantică lua forma

unui sentiment de vinovăție pozitivist: unii teoreticieni se temeau că, vorbind despre valorile câmpurilor electric și magnetic într-un punct din spațiu ocupat de un electron, comiteau păcatul de a introduce în fizică elemente care în principiu nu pot fi observate. Acest lucru era adevărat, dar temerile legate de el nu au făcut decât să întârzie descoperirea soluției reale la problema infinitilor, aceea că infinitii se anulează când masa și sarcina electronului sunt definite atent.

Pozitivismul a jucat de asemenea un rol-cheie într-o reacție împotriva teoriei cuantice a câmpului în fruntea căreia s-a aflat în anii '60 Geoffrey Chew de la Berkeley. Pentru Chew, obiectul central de interes în fizică era matricea S , care dă probabilitățile pentru toate rezultatele posibile ale tuturor ciocnirilor posibile dintre particule. Matricea S rezumă tot ce e realmente observabil în reacțiile care implică orice număr de particule. Teoria matricii S are la origine cercetările lui Heisenberg și ale lui John Wheeler din anii '30 și '40 (litera „ S ” vine de la *Streung*, care în germană înseamnă „împrăștiere”), dar Chew și colaboratorii săi foloseau idei noi pentru calculul matricii S , fără a introduce elemente neobservabile cum sunt câmpurile cuantice. În cele din urmă, programul a eșuat, în parte fiindcă pur și simplu era prea greu de calculat matricea S prin această metodă, dar în primul rând fiindcă s-a dovedit că progresul în înțelegerea forțelor nucleare slabe și tari se baza pe teoriile cuantice de câmp, teorii pe care Chew încerca să le abandoneze.

Cel mai spectaculos abandon al principiilor pozitivismului se leagă de dezvoltarea teoriei actuale a cuarcilor. La începutul anilor '60, Murray Gell-Mann și George Zweig au încercat, independent unul de altul, să reducă uriașa complexitate din fauna particulelor cunoscute la acea dată. Ei au emis ipoteza că aproape toate aceste particule sunt alcătuite din câteva particule simple (încă „mai elementare”) pe care Gell-Mann le-a numit cuarci. La început ideea nu părea să intre în contradicție cu felul în care obișnuiau fizicienii să gândească; la urma urmei, nu era decât un pas înainte într-o direcție inaugurată de Leucip și Democrit, încercarea de a explica structuri complicate prin constituenți mai mici și mai simpli. Modelul cuarcilor a fost aplicat în anii '60 unei mari diversități

de probleme fizice legate de proprietățile neutronilor, protonilor, mezonilor și tuturor celorlalte particule presupuse a fi alcătuite din cuarci, și în general a dat rezultate destul de bune. Dar, cu toate eforturile fizicienilor experimentatori din anii '60 și de la începutul anilor '70, a fost imposibilă extragerea cuarcilor din particulele care se presupunea că îi conțin. Părea o nebunie. De când Thomson extrăsese electroni din atomi într-un tub catodic, fusese mereu posibil să se desfacă orice sistem compus, cum ar fi o moleculă, un atom sau un nucleu, în particulele individuale din care e alcătuit. De ce ar fi atunci imposibil să se izoleze cuarci liberi?

Modelul cuarcilor a devenit coerent în anii '70, odată cu apariția cromodinamicii cuantice, teoria modernă a forțelor nucleare tari, care interzice orice proces în care un cuarc liber ar putea fi izolat. Rezolvarea a venit în 1973, când calcule independente ale lui David Gross și Frank Wilczek de la Princeton și David Politzer de la Harvard au arătat că anumite tipuri de teorii cuantice de câmp au o stranie proprietate, numită „libertate asimptotică”: forțele scad la energii înalte. Tocmai o asemenea scădere a forței fusese observată în experimentele de împrăștiere la energii înalte încă din 1967, dar acum era prima oară când o teorie putea prezice acest comportament al forțelor. S-a ajuns astfel în scurt timp la una din aceste teorii cuantice de câmp, teoria cuarcilor și gluonilor, numită cromodinamica cuantică, acceptată rapid drept teoria corectă a forțelor nucleare tari.

Inițial s-a presupus că producerea gluonilor nu fusese observată în ciocnirile particulelor elementare fiindcă aceștia sunt grei, iar în ciocniri nu existase suficientă energie pentru a produce masele mari ale gluonilor. La scurt timp de la descoperirea libertății asimptotice, câțiva fizicieni teoreticieni au emis ipoteza că gluonii au masă nulă, la fel ca fotonii. Dacă acest lucru e adevărat, atunci motivul pentru care gluonii, și probabil că și cuarcii, nu sunt observați ar trebui să fie acela că schimbul de gluoni cu masă nulă între cuarci sau între gluoni produce forțe cu rază lungă de acțiune care fac în principiu imposibilă separarea cuarcilor sau gluonilor. Se crede acum că dacă încerci, de pildă, să desfaci unui mezon (particulă alcătuită dintr-un cuarc și un anticuarc), forța necesară crește pe măsură ce cuarcul se îndepărtează de anticuarc, până când

în cele din urmă trebuie să investești atât de multă energie în acest efort încât e disponibilă suficientă energie pentru a crea o nouă pereche cuarc-anticuarc. Un antiquarc se ivește atunci din vid și se unește cu cuarcul inițial, iar un cuarc se ivește din vid și se unește cu antiquarcul inițial, astfel încât, în loc să ai un cuarc și un antiquarc liberi, ai pur și simplu două perechi cuarc-anticuarc, adică doi mezonii. Fenomenul e deseori comparat cu încercarea de a separa cele două capete ale unei sfori: poți trage tot mai mult, iar în cele din urmă, dacă investești suficientă energie în acest efort, sfoara se rupe, dar nu rămâi niciodată cu două capete izolate ale sforii inițiale; ai două bucăți de sfoară, fiecare cu câte două capete. Ideea că cuarcii și gluonii nu pot fi în principiu niciodată observați izolați a fost integrată în perspectiva modernă asupra particulelor elementare, dar asta nu ne împiedică să considerăm că neutronii, protonii și mezonii sunt alcătuiți din cuarci și să-i tratăm ca atare. Nu-mi închipui ceva care să-i fi plăcut mai mult lui Ernst Mach.

Teoria cuarcilor a fost numai un pas dintr-un proces continuu de reformulare a teoriilor fizice în termeni din ce în ce mai profunzi și în același timp din ce în ce mai îndepărtați de experiența de zi cu zi. Cum putem spera să elaborăm o teorie bazată pe observabile, dacă nici un aspect al experienței noastre – poate nici măcar spațiul și timpul – nu apare la nivelul cel mai profund al teoriilor noastre? Mi se pare improbabil ca atitudinea pozitivistă să ne fie de mare folos în viitor.

Metafizica și epistemologia și-au propus cel puțin să joace un rol constructiv în știință. În ultimii ani știința a fost atacată de oponenți declarați uniți sub stindardul relativismului. Filozofii relativiști neagă pretenția științei de a descoperi adevărul obiectiv; ei o privesc doar ca pe un fenomen social între multe altele, care nu este fundamental diferit de un cult al fertilității sau de o sărbătoare amerindiană.

Relativitismul filozofic își are în parte rădăcinile în descoperirea filozofilor și istoricilor științei că există un important element subiectiv în procesul prin care ideile științifice ajung să fie acceptate. Am văzut aici ce rol au judecățile estetice în acceptarea noilor teorii din fizică. Lucrul e bine cunoscut de oamenii de știință (dar filozofii și istoricii lasă uneori să se înțeleagă că noi am fi complet ignoranți în această privință). În celebra sa carte *Structura*

revoluțiilor științifice, Thomas Kuhn a făcut un pas înainte arătând că în revoluțiile științifice standardele (sau „paradigmele”) după care oamenii de știință judecă teoriile se schimbă, așa încât noile teorii pur și simplu nu mai pot fi judecate după standardele prerevoluționare. Multe lucruri din cartea lui Kuhn se potrivesc cu propria mea experiență științifică. Dar în ultimul capitol Kuhn încearcă să respingă ideea că știința înaintază către adevăruri obiective: „Putem, sau mai bine zis trebuie, să renunțăm la ideea, explicită sau implicită, că schimbările de paradigmă îi aduc pe oamenii de știință și pe cei care învață de la ei din ce în ce mai aproape de adevăr.” În ultimul timp cartea lui Kuhn pare să fie citită (sau cel puțin citată) ca un manifest al atacului general împotriva pretensei obiectivității a științei.

A existat de asemenea o tendință tot mai accentuată a sociologilor și antropologilor, începând cu cercetările lui Robert Merton din anii '30, de a trata știința (sau cel puțin alte științe decât sociologia și antropologia) cu metodele folosite în studiul altor fenomene sociale. Desigur, știința *este* un fenomen social, cu propriul său sistem de recompense, cu snobismele sale tipice, cu mecanismele sale interesante de alianță și autoritate. De pildă, Sharon Traweek a petrecut ani întregi alături de experimentatorii care lucrează în fizica particulelor elementare, atât la Stanford, cât și la Laboratorul KEK din Japonia, și și-a prezentat observațiile din perspectiva unui antropolog. Acest gen de „știință mare” e un subiect firesc pentru antropologi și sociologi, din moment ce oamenii de știință aparțin unei tradiții anarhice care prețuiește inițiativa individuală, iar ei descoperă că în experimentele din zilele noastre trebuie să lucreze împreună în echipe de sute de oameni. Ca teoretician, eu nu am lucrat într-o asemenea echipă, dar cred că multe dintre observațiile ei sunt corecte, de exemplu:

Fizicienii se consideră o elită ai cărei membri sunt aleși numai pe baza meritelor științifice. Se presupune că toți pornesc cu șanse egale. Acest fapt e subliniat de un cod vestimentar lipsit de orice formalism, de asemănarea birourilor lor și de „tutuirea” practică în cadrul comunității. Individualismul competitiv e considerat corect și eficient: ierarhia e privită ca o meritocrație care produce o fizică

de calitate. Și totuși, fizicienii americani subliniază că știința nu e democrată: deciziile asupra obiectivelor științifice nu trebuie luate pe baza regulii majorității din cadrul comunității, și nici nu trebuie să existe un acces egal la resursele laboratorului. În privința acestor două aspecte, majoritatea fizicienilor japonezi împărtășesc o opinie contrară.

În cursul acestor studii, sociologii și antropologii au descoperit că însuși procesul de schimbare a teoriei științifice este unul social. O carte recentă pe această temă arată că „adevărurile științifice sunt în fond acorduri sociale citate în repetate rânduri privind ceea ce este «real», acorduri la care s-a ajuns printr-un «proces științific» de negociere“. Observarea atentă a felului în care lucrează oamenii de știință la Institutul Salk i-a făcut pe filozoful francez Bruno Latour și pe sociologul englez Steve Woolgar să afirme: „Negocierile privind ce anume constituie o dovadă sau un bun test sunt la fel de dezordonate ca orice dispută între avocați și politicieni.“

Se pare că nu a fost decât un pas de la aceste utile observații istorice și sociologice până la poziția radicală după care acceptarea conținutului teoriilor științifice ține de conjunctura socială și istorică în care teoriile sunt negociate. (Dezvoltarea acestui punct de vedere e programul cel mai ambițios din sociologia științei.) Acest atac împotriva obiectivității cunoașterii științifice devine explicit și chiar e introdus în titlul unei cărți a lui Andrew Pickering: *Construind cuaricii*. În capitolul final, el ajunge la concluzia: „Și, dat fiind antrenamentul intens în tehnici matematice sofisticate, preponderența matematicii în descrierea realității de către fizicieni nu e mai greu de explicat decât dragostea grupurilor etnice pentru limba lor maternă. După cum am văzut în acest capitol, nimeni dintre cei care vor să-și facă o imagine asupra lumii nu e obligat să țină cont de ce spune știința secolului XX.“ Pickering prezintă în detaliu o importantă schimbare de interes în fizica experimentală a energiilor înalte care a avut loc la sfârșitul anilor '60 și începutul anilor '70. În locul unei abordări de bun-simț (termenul lui Pickering) în care să se concentreze asupra celor mai remarcabile fenomene din ciocnirile particulelor la energii înalte (de pildă fragmentarea particulelor într-un mare număr de alte particule care se

deplasează în principal în direcția inițială a fasciculului), experimentatorii au început să efectueze experimente sugerate de teoreticieni, experimente care s-au axat pe evenimente rare, cum ar fi acelea în care particule de energii înalte sunt împrăștiate în urma ciocnirii sub un unghi mare față de direcția fasciculului incident.

Cu siguranță a existat o schimbare de interes în fizica energiilor înalte destul de asemănătoare cu cea prezentată de Pickering, dar ea a fost determinată de cerințele misiunii istorice a fizicii. Un proton e constituit din trei cuarci, împreună cu un nor de gluoni și perechi cuarc-anticuarc care apar și dispar continuu. În majoritatea ciocnirilor dintre protoni, energia particulelor inițiale e folosită la dezmembrarea a acestor nori de particule, la fel ca în ciocnirea a două camioane cu gunoi. Acestea par să fie cele mai remarcabile ciocniri, dar sunt prea complicate pentru a ne permite să calculăm ce ar trebui să se întâmple conform teoriilor noastre actuale despre cuarci și gluoni, așa încât nu folosesc la testarea teoriei. Dar, din când în când, un cuarc sau un gluon al unui proton lovește un cuarc sau un gluon al celuilalt proton, iar energia lor devine disponibilă pentru a proiecta acești cuarci sau gluoni cu energie mare din resturile ciocnirii, proces a cărui rată știm s-o calculăm. Sau ciocnirea poate crea noi particule, ca particulele W și Z , purtătoare ale forței nucleare slabe, prin studierea cărora putem afla mai multe despre unificarea forțelor slabă și electromagnetică. Experimentele de astăzi sunt proiectate să detecteze tocmai aceste evenimente rare. Și totuși Pickering, care pare să înțeleagă foarte bine fondul teoretic al problemei, prezintă această schimbare de interes din fizica energiilor înalte ca și cum ar fi doar o schimbare de modă, la fel ca trecerea de la impresionism la cubism sau de la fustele scurte la fustele lungi.

E pur și simplu un raționament vicios ca, pornind de la observația că știința e un proces social, să tragem concluzia că produsul ei final, teoriile noastre științifice, este determinat de forțele sociale și istorice care acționează în acest proces. O echipă de alpiniști poate discuta cea mai bună cale de acces spre vârf, aceste dezbateri putând fi condiționate de structura istorică și socială a expediției, dar în cele din urmă ei fie vor găsi o cale bună spre vârf, fie nu, iar când vor ajunge acolo vor afla acest lucru. (Nimeni nu ar da

unei cărți despre alpinism titlul *Construind Everestul*.) Eu nu pot demonstra că același lucru e valabil și pentru știință, dar întreaga mea experiență de om de știință mă convinge că e adevărat. „Negocierile“ privind schimbările din teoriile științifice continuă, oamenii de știință răzgândindu-se mereu ca reacție la calcule și la experimente, până când o perspectivă sau alta capătă amprenta inconfundabilă a succesului obiectiv. Am certitudinea că descoperim ceva real în fizică, ceva ce nu are nici o legătură cu condițiile sociale sau istorice care ne-au permis să-l descoperim.

Atunci de unde provine acest atac radical împotriva obiectivității cunoașterii științifice? Cred că una din surse e vechea sperietoare a pozitivismului, aplicată de data asta însuși studiului științei. Dacă refuzi să vorbești despre orice lucru care nu e observat direct, atunci teoriile cuantice ale câmpului, principiile de simetrie sau legile mai generale ale naturii nu pot fi luate în serios. Ceea ce *pot* studia filozofii, sociologii și antropologii este comportamentul efectiv al oamenilor de știință reali, iar acest comportament nu se conformează niciodată unei descrieri simple prin deducții. Dar oamenii de știință au experiența directă a teoriilor științifice, știu bine că ele sunt scopurile inefabile către care ținesc, și se conving de realitatea acestor teorii.

Ar putea exista și o altă explicație pentru atacul contra realismului și obiectivității științei, una mai banală. Închipuiți-vă un antropolog care studiază un cult al cargoului* pe o insulă din Pacific. Insularii cred că pot face să se întoarcă avionul cu mărfuri care le-a adus prosperitatea în timpul celui de al Doilea Război Mondial dacă își construiesc structuri de lemn ce imită antenele de radar și de radio. E absolut firesc ca acest antropolog (și alți sociologi și antropologi aflați în situații asemănătoare) să simtă un frison de superioritate fiindcă el știe, iar subiecții lui nu știu, că nu există nici o realitate obiectivă în aceste credințe – nici un avion C-47

* Un cult al cargoului apare în societățile tribale izolate care interacționează cu civilizații mai avansate tehnologic. Prin ritualuri și practici religioase se urmărește dobândirea bunurilor (*cargo* = încărcătura unui vas, a unui avion, prin extensie orice mărfuri) pe care occidentalii le aduc cu ei și care, în gândirea magică a băștinașilor, sunt de origine divină. (*N. red.*)

încărcat cu mărfuri nu va fi vreodată atras de radarele din lemn. Ar fi oare surprinzător ca, atunci când își îndreaptă atenția spre studiul activității oamenilor de știință, antropologii și sociologii să încerce să retrăiască acel încântător sentiment de superioritate, negând realitatea obiectivă a descoperirilor oamenilor de știință?

Relativismul este doar un aspect al unui atac mai cuprinzător, radical, împotriva științei înseși. Feyerabend a pledat pentru o separare între știință și societate, asemenea separării dintre biserică și stat, susținând că „știința e doar una dintre numeroasele ideologii care împing mai departe societatea, și trebuie tratată ca atare”. Sandra Harding consideră știința modernă (și în special fizica) „nu numai sexistă, ci și rasistă, clasistă și coercitivă cultural”. Și argumentează: „Fizica și chimia, matematica și logica poartă amprențele creatorilor lor nu mai puțin decât antropologia și istoria”. Theodore Roszak ne îndeamnă să ne modificăm „sensibilitatea fundamentală a gândirii științifice [...] chiar dacă trebuie să revizuiem drastic caracterul specializat al științei și locul ei în cultura noastră”.

Aceste critici radicale la adresa științei par a avea un efect neînsemnat sau chiar nul asupra oamenilor de știință. Nu cunosc nici un om de știință care să le ia în serios. Pericolul pe care ele îl prezintă pentru știință provine din posibila lor influență asupra celor care nu participă efectiv la efortul științific, dar de care depindem, în special asupra celor ce răspund de finanțarea proiectelor științifice, precum și asupra noilor generații de potențiali oameni de știință. Recent, ministrul cercetării științifice din Marea Britanie a fost citat de revista *Nature* că aprobă o carte a lui Bryan Appleyard în care se susține că știința e inamicul spiritului uman.

Cred că Gerald Holton nu este departe de adevăr când vede în atacul radical împotriva științei un simptom al unei ostilități mai vaste împotriva civilizației occidentale care a început cu Oswald Spengler. Știința modernă e o țintă evidentă a acestei ostilități; artă și literatură de mare valoare au apărut în multe din civilizațiile lumii, dar începând cu Galilei cercetarea științifică a fost covârșitor dominată de Occident.

Această ostilitate mi se pare în mod tragic greșit orientată. Chiar și cele mai înspăimântătoare aplicații occidentale ale științei, cum ar fi armele nucleare, reprezintă doar unul dintre numeroasele

exemple privind eforturile neîncetate ale omenirii de a se autodistruge cu orice arme poate născoci. Punând toate acestea în balanță cu aplicațiile benigne ale științei și cu rolul ei în eliberarea spiritului uman, cred că știința modernă, împreună cu democrația și muzica polifonică, e o contribuție a Occidentului de care trebuie să fim mândri.

În cele din urmă, această problemă va dispărea. Metodele și cunoștințele științifice moderne s-au răspândit rapid în alte țări, precum Japonia și India, și se răspândesc efectiv pe întreg globul. Putem privi cu încredere spre ziua în care știința nu va mai fi identificată cu Occidentul, ci va fi privită ca un bun al întregii omeniri.

CAPITOLUL VIII

Melancolia secolului XX

*Melancolie,
Melancolia secolului douăzeci,
Mă scoate din minți.
Cine
A scăpat de acea obositoare
Melancolie a secolului douăzeci.*
NOËL COWARD, *Cavalcade*

De fiecare dată când am putut urmări șirul întrebărilor despre forță și materie suficient de departe, am văzut că răspunsurile trimiteau la modelul standard al particulelor elementare. Începând cu sfârșitul anilor '70, la fiecare conferință de fizica energiilor înalte experimentatorii au anunțat un tot mai bun acord între rezultatele lor și predicțiile modelului standard. S-ar putea crede că fizicienii din domeniul energiilor înalte sunt destul de mulțumiți, prin urmare, de unde atâta melancolie?

În primul rând, modelul standard descrie forța electromagnetică și forțele nucleare slabă și tare, dar lasă deoparte a patra forță, de fapt prima dintre forțe care a fost cunoscută, forța gravitațională. Această omisiune nu e o simplă neatenție; după cum vom vedea, există obstacole matematice formidabile în descrierea gravitației cu același limbaj pe care îl folosim la descrierea celorlalte forțe din modelul standard, limbajul teoriei cuantice a câmpului. În al doilea rând, deși forța nucleară tare *este* inclusă în modelul standard, ea apare ca ceva diferit de forțele electromagnetică și nucleară slabă, nu ca o parte dintr-o imagine unificată. În al treilea rând, deși modelul standard tratează forța electromagnetică și forța nucleară slabă într-un mod unificat, există diferențe evidente între aceste două forțe. (De exemplu, în condiții obișnuite forța nucleară slabă este mult mai slabă decât forța electromagnetică.) Avem o

idee generală asupra modului în care apar diferențele între forța electromagnetică și cea slabă, dar nu înțelegem pe deplin sursa acestor diferențe. În fine, în afară de problema unificării celor patru forțe, modelul standard are multe trăsături care nu sunt dictate de principii fundamentale (așa cum ne-ar plăcea) și care trebuie pur și simplu luate din experiment. Aceste trăsături aparent arbitrare includ catalogul particulelor, un număr de constante cum ar fi raporturile maselor și chiar simetriile înseși. Ne putem imagina cu ușurință că oricare din aceste trăsături ale modelului standard, sau chiar toate, ar putea fi diferite.

Evident, modelul standard este un uriaș progres față de amalgamul simetriilor aproximative, presupunerile dinamice prost formulate și simplele date pe care generația mea de fizicieni a trebuit să le învețe în facultate. Dar cu certitudine modelul standard nu este răspunsul final, iar pentru a-l depăși va trebui să ne luptăm cu toate neajunsurile sale.

Toate aceste probleme ale modelului standard se leagă într-un fel sau altul de fenomenul cunoscut sub numele de *rupere spontană a simetriei*. Descoperirea acestui fenomen a fost unul dintre marile progrese din știința secolului XX, mai întâi în fizica stării condensate, iar apoi în fizica particulelor elementare. Cel mai important succes al său a fost explicarea diferențelor dintre forța slabă și cea electromagnetică, așa încât teoria electroslabă e un bun punct de pornire pentru a prezenta fenomenul de rupere spontană a simetriei.

Teoria electroslabă este partea modelului standard care se ocupă cu forțele slabă și electromagnetică. Ea se bazează pe un principiu de simetrie *exact*, care afirmă că legile naturii iau aceeași formă dacă peste tot în ecuațiile teoriei înlocuim câmpurile electronice și neutrinice cu câmpuri mixte – de pildă, un câmp care este 30% electronic și 70% neutrinic și altul care este 70% electronic și 30% neutrinic – și în același timp amestecăm în mod asemănător și câmpurile altor familii de particule, cum ar fi cuarcul „up” și cuarcul „down”. Acest principiu de simetrie e numit *local*, ceea ce înseamnă că legile naturii rămân neschimbate chiar dacă aceste amestecuri variază de la un moment la altul sau de la o poziție la alta. Mai există o familie de câmpuri, a căror existență e *dictată* de acest principiu de simetrie cam la fel cum existența câmpului

gravitațional e dictată de simetria între diferitele sisteme de coordonate. Această familie constă din câmpurile fotonului și particulelor W și Z , iar aceste câmpuri trebuie la rândul lor amestecate între ele când amestecăm câmpurile electronului și neutrinelui și câmpurile cuarcilor. Schimbul de fotoni e responsabil de forța electromagnetică, iar schimbul de particule W și Z produce forța nucleară slabă, așa încât această simetrie între electroni și neutrini e în același timp o simetrie între forța electromagnetică și forța nucleară slabă.

Dar această simetrie nu e evidentă în natură, ceea ce explică de ce a durat atât de mult până să fie descoperită. De exemplu, electronii și particulele W și Z au masă, dar neutrinii și fotonii nu au. (Masa mare a particulelor W și Z face ca forțele slabe să fie mult mai slabe decât forțele electromagnetice.) Cu alte cuvinte, simetria care leagă electronul, neutrinelul și așa mai departe e o proprietate a ecuațiilor fundamentale ale modelului standard, ecuații care dictează proprietățile particulelor elementare, dar această simetrie nu e satisfăcută de *soluțiile* acestor ecuații – proprietățile particulelor înseși.

Pentru a înțelege cum e posibil ca ecuațiile să aibă o simetrie iar soluțiile lor nu, să presupunem că ecuațiile noastre ar fi complet simetrice în raport cu două tipuri de particule, cum ar fi cuarcul „up” și cuarcul „down”, și că am vrea să rezolvăm aceste ecuații pentru a găsi masele celor două particule. Am putea presupune că simetria dintre cele două tipuri de cuarci ar impune ca masele celor doi cuarci să fie egale, dar aceasta nu e singura posibilitate. Simetriile ecuațiilor nu exclud soluția în care cuarcul „up” are o masă mai mare decât cuarcul „down”; în acest caz trebuie să existe o *a doua* soluție a ecuațiilor în care masa cuarcului „down” e mai mare decât masa cuarcului „up” cu exact aceeași cantitate. Prin urmare, simetria ecuațiilor nu se reflectă neapărat în fiecare soluție individuală a acestor ecuații, ci doar în structura *tuturor* soluțiilor ecuațiilor. În acest exemplu simplu, proprietățile reale ale cuarcilor ar corespunde uneia sau alteia dintre cele două soluții, reprezentând o rupere a simetriei teoriei de bază. Observați că nu contează care dintre cele două soluții apare în natură – dacă singura diferență dintre cuarcii „up” și „down” ar fi legată de masele lor,

atunci diferența între cele două soluții ar fi pur și simplu o chestiune de alegere a cuarcilor pe care să-i numim „up” sau „down”. Natura așa cum o cunoaștem reprezintă o soluție a tuturor ecuațiilor modelului standard, și nu contează *care anume* soluție, atât timp cât aceste soluții diferite sunt toate legate prin principii exacte de simetrie.

În asemenea cazuri spunem că simetria e ruptă, deși un cuvânt mai potrivit ar fi „ascunsă”, deoarece simetria există mai departe în ecuații, iar aceste ecuații guvernează proprietățile particulelor. Numim acest fenomen *rupere spontană de simetrie*, pentru că nimic nu rupe simetria din ecuațiile teoriei; ruperea de simetrie apare spontan în diferitele soluții ale acestor ecuații.

Principiile de simetrie dau teoriilor noastre mult din frumusețea lor. Din acest motiv s-a creat atâta vâlvă la începutul anilor '60, când fizicienii particulelor elementare au început să se gândească la ruperea spontană de simetrie. Brusc, am înțeles că există mult mai multă simetrie în legile naturii decât am putea bănuși din simpla observare a proprietăților particulelor elementare. Ruperea de simetrie seamănă mult cu ideile platoniciene: realitatea pe care o observăm în laboratoarele noastre e doar reflectarea imperfectă a unei realități mai profunde și mai frumoase, realitatea ecuațiilor care prezintă toate simetriile teoriei.

Un magnet permanent obișnuit oferă un bun exemplu de rupere a simetriei. (Acest exemplu e nimerit mai ales pentru că ruperea spontană a simetriei și-a făcut pentru prima oară apariția în fizica cuantică în teoria magnetismului permanent elaborată de Heisenberg în 1928.) Ecuațiile care guvernează atomii de fier și câmpul magnetic dintr-un magnet sunt perfect simetrice în raport cu direcțiile din spațiu; nimic în aceste ecuații nu face distincție între nord și sud sau est sau jos. Totuși, când o bucată de fier este răcită sub 770°C , în mod spontan apare în ea un câmp magnetic orientat într-o anumită direcție, rupând simetria între diferitele direcții. O specie de ființe mici care se nasc și trăiesc toată viața în interiorul unui magnet permanent ar avea nevoie de un timp îndelungat pentru a înțelege că legile naturii posedă de fapt o simetrie în raport cu diferitele direcții în spațiu și că doar în mediul lor pare să existe o direcție preferențială, deoarece spinii atomilor

de fier s-au aliniat în mod spontan în aceeași direcție, producând un câmp magnetic.

Noi, asemenea ființelor din magnet, am descoperit recent o simetrie care se întâmplă să fie ruptă în universul *nostru*. E vorba de simetria între forța slabă și cea electromagnetică, a cărei ruptură se vede, de exemplu, în deosebiriile dintre fotonul de masă nulă și particulele foarte grele W și Z . O diferență esențială între ruperea simetriei din modelul standard și cea dintr-un magnet este că originea magnetizării e bine înțeleasă. Ea se datorează unor forțe electromagnetice cunoscute dintre atomii de fier vecini, care tind să-și alinieze spinii paralel. Modelul standard rămâne un mister. Nici una dintre forțele cunoscute ale modelului standard nu este suficient de puternică pentru a fi răspunzătoare de ruperea simetriei dintre forțele slabă și electromagnetică. Cel mai important lucru pe care nu îl știm încă despre modelul standard este ce anume produce ruperea simetriei electrolabe.

În versiunea inițială a teoriei standard a forțelor slabe și electromagnetice, ruperea simetriei dintre aceste forțe a fost atribuită unui nou câmp, introdus în teorie tocmai în acest scop. Se presupunea că acest câmp ia naștere spontan, asemenea câmpului magnetic dintr-un magnet permanent, fiind îndreptat într-o direcție precisă – nu o direcție din spațiul obișnuit, ci o direcție din micile cadrane imaginare care disting electronii de neutrini, fotonii de particulele W și Z și așa mai departe. Valoarea câmpului care rupe simetria e numită *valoarea de vid* a sa, deoarece câmpul ia această valoare în vid, departe de influența vreunor particule. După un sfert de secol încă nu știm dacă această reprezentare simplă a ruperii simetriei este corectă, dar ea rămâne cea mai plauzibilă posibilitate.

Nu e pentru prima dată când fizicienii propun existența unui nou câmp sau particulă pentru a satisface unele cerințe teoretice. La începutul anilor '30 fizicienii erau îngrijorați de o aparentă violare a legii conservării energiei atunci când un nucleu radioactiv suferă procesul cunoscut sub numele de dezintegrare beta. În 1932 Wolfgang Pauli propunea existența unei particule convenabile pe care el a numit-o neutrin, pentru a explica pierderea de energie observată în acest proces. Misteriosul neutrin a fost până la urmă descoperit experimental, după mai bine de douăzeci de ani. A

propune existența a ceva ce nu a fost încă observat este un lucru riscant, dar uneori reușește.

Ca orice alt câmp dintr-o teorie cuantică, acest nou câmp responsabil de ruperea simetriei electrolabe ar trebui să aibă o energie și un impuls care apar sub formă de pachete, numite cuante. Teoria electrolabă ne spune că cel puțin una dintre aceste cuante ar trebui să fie observabilă ca o nouă particulă elementară. Cu câțiva ani înainte ca Salam și cu mine să elaborăm o teorie a forțelor slabe și electromagnetice bazată pe ruperea spontană a simetriei, matematica unor exemple mai simple pentru acest tip de rupere a simetriei fusese deja pusă la punct de câțiva teoreticieni, cel mai explicit de Peter Higgs de la Universitatea din Edinburgh, în 1964. Prin urmare noua particulă necesară în versiunea inițială a teoriei electrolabe a fost numită *particulă Higgs*.

Nimeni nu a descoperit o particulă Higgs, dar asta nu contrazice încă teoria; o particulă Higgs nu putea fi văzută în nici un experiment efectuat până în prezent dacă masa ei e mai mare decât de aproximativ cincizeci de ori masa protonului, ceea ce e destul de probabil. (Din nefericire, teoria electrolabă nu ne spune nimic despre masa particulei Higgs, cu excepția faptului că aproape sigur nu este mai grea decât un bilion de volți, de o mie de ori masa protonului.) Avem nevoie de experiment pentru a ști dacă există într-adevăr o particulă Higgs, sau poate mai multe particule Higgs, și pentru a afla masele lor.

Aceste probleme au o importanță care depășește întrebarea cum se produce ruperea simetriei electrolabe. Una dintre noutățile pe care le-am aflat din teoria electrolabă este că toate particulele modelului standard, în afară de particula Higgs, au masele determinate de ruperea simetriei între forțele slabe și forțele electromagnetice. Dacă am putea cumva anula această rupere a simetriei, atunci electronul, particulele W și Z și toți cuarcii ar avea masă nulă, la fel ca fotonii și neutrinii. Problema înțelegerii maselor particulelor elementare cunoscute este, prin urmare, o parte a problemei înțelegerii mecanismului prin care simetria electrolabă e ruptă în mod spontan. În versiunea inițială a modelului standard, particula Higgs e singura particulă a cărei masă apare direct în ecuațiile teoriei; ruperea simetriei electrolabe conferă tuturor

celorlalte particule mase care sunt proporționale cu masa particulei Higgs. Dar nu avem nici un motiv să credem că lucrurile sunt atât de simple.

Problema cauzei ruperii simetriei electrolabe e importantă nu numai în fizică, ci și în eforturile de a înțelege istoria timpurie a universului nostru. Așa cum magnetizarea unei bucăți de fier poate fi anulată, iar simetria între diferitele direcții, restaurată, ridicând temperatura fierului la peste 770 de grade, și simetria dintre forțele slabe și electromagnetice ar putea fi restaurată dacă am putea ridica temperatura laboratorului nostru la câteva milioane de miliarde de grade. La asemenea temperaturi simetria nu ar mai fi ascunsă, ci ar fi vizibilă în proprietățile particulelor din modelul standard. (De exemplu, la aceste temperaturi, electronul, particulele W și Z și toți cuarcii ar avea masă zero.) Temperaturi de un milion de miliarde de grade nu pot fi create în laborator și nu există actualmente nici măcar în centrul celor mai fierbinți stele. Dar, conform cu cea mai simplă versiune a teoriei cosmologice general acceptate a big bang-ului, a existat un moment în urmă cu zece-douăzeci de miliarde de ani când temperatura universului era infinită. La aproximativ o zecime de miliardime de secundă după acest moment de început, temperatura universului scăzuse la câteva milioane de miliarde de grade, iar în acest moment simetria dintre forțele slabe și electromagnetice a fost ruptă.

Această rupere a simetriei n-a avut probabil loc instantaneu și uniform. În „transformări de fază“ mai familiare nouă, cum ar fi înghețarea apei sau magnetizarea fierului, tranziția poate avea loc puțin mai devreme sau mai târziu în locuri diferite, și poate să nu aibă loc în același mod pretutindeni, cum vedem de exemplu când se formează mici cristale de gheață separate sau zone într-un magnet în care magnetizarea e orientată în direcții diferite. Acest tip de complicație în tranziția de fază electrolabă ar fi putut avea diferite efecte detectabile, de pildă asupra abundenței elementelor ușoare care s-au format câteva minute mai târziu. Nu putem însă evalua aceste posibilități până nu înțelegem mecanismul prin care simetria electrolabă a fost ruptă.

Știm că există o simetrie ruptă între forțele slabe și electromagnetice, deoarece teoria care se bazează pe această simetrie

funcționează – ea a oferit un mare număr de predicții corecte privind proprietățile particulelor W și Z și privind forțele pe care acestea le transmit. Dar nu suntem absolut siguri că simetria electroslabă este ruptă de valoarea de vid a unui câmp din teorie sau dacă există o particulă Higgs. Ceva trebuie să fie inclus în teoria electroslabă pentru a rupe această simetrie, dar e posibil ca ruperea simetriei electroslabă să se datoreze efectelor indirecte ale unui nou tip de forță extra-tare, care nu acționează asupra cuarcilor, electronilor și neutrinilor obișnuiți, din acest motiv nefiind încă detectată. Asemenea teorii au apărut la sfârșitul anilor '70, dar s-au confruntat și ele cu propriile lor dificultăți. Una dintre misiunile principale ale acceleratorului supracoductor, aflat acum în construcție, este să lămurească această problemă.

Povestea ruperii spontane a simetriei nu se încheie însă aici. Ideea ruperii spontane a simetriei a jucat de asemenea un rol în eforturile noastre de a aduce a treia forță a modelului standard, forța nucleară tare, în același cadru unificat alături de forțele slabă și electromagnetică. Deși diferențele evidente dintre forțele slabă și electromagnetică sunt explicate în modelul standard ca rezultat al ruperii spontane a simetriei, acest lucru nu e valabil pentru forța nucleară tare; nu există vreo simetrie nici măcar în ecuațiile modelului standard care să lege forțele nucleare tari de forțele slabe și electromagnetice. De la începutul anilor '70, aceasta a condus la căutarea unei teorii mai profunde decât modelul standard, în care interacțiile tari, slabe și electromagnetice să fie unificate de un singur mare grup de simetrii rupte spontan.

Exista un obstacol evident pentru orice gen de unificare urmând aceste direcții. Tăriile aparente ale forțelor din orice teorie de câmp depind de două tipuri de parametri numerici: masele (dacă există) particulelor asemenea particulelor W și Z care transmit forțele și anumite *tării intrinseci* (numite și constante de cuplaj) ce caracterizează probabilitatea ca anumite particule, precum fotonii, gluonii sau particulele W și Z , să fie emise și reabsorbite în reacțiile particulelor. Masele provin din ruperea spontană a simetriei, dar tăriile intrinseci sunt numere care apar în ecuațiile fundamentale ale teoriei. Orice simetrie care leagă forțele tari, slabe și electromagnetice, chiar dacă e ruptă spontan, impune ca tăriile intrinseci

ale forțelor electrolabe și tari (definite corespunzător) să fie egale. Diferențele vizibile dintre tăriile forțelor ar trebui să fie atribuite ruperii spontane a simetriei care produce diferențe între masele particulelor ce transmit forțele, foarte asemănător modului în care diferențele dintre forțele electromagnetice și slabe apar în modelul standard din faptul că ruperea simetriei electrolabe face ca particulele W și Z să aibă mase foarte mari, în timp ce fotonul are masă nulă. Dar e limpede că tăriile intrinseci ale forțelor nucleare tari și electromagnetice *nu* sunt egale; forța nucleară tare, după cum sugerează și numele, e mult mai puternică decât forța electromagnetică, deși ambele forțe sunt transmise de particule cu masă nulă, gluonii și fotonii.

În 1974 a apărut o idee care oferea posibilitatea evitării acestui obstacol. Tăriile intrinseci ale tuturor acestor forțe depind în realitate foarte slab de energiile proceselor în care sunt măsurate. În orice tip de teorie care unifică forțele tari cu cele electrolabe, ar fi de așteptat ca aceste tării intrinseci să fie egale la o anumită energie, dar această energie ar putea diferi mult de energiile din experimentele actuale. Există trei tării intrinseci independente ale forțelor din modelul standard (acesta e unul din motivele pentru care modelul standard nu e un bun candidat pentru o teorie finală), deci nu e o condiție banală faptul că trebuie să existe o energie la care toate tăriile forțelor să fie egale. Prin impunerea acestei condiții s-a putut face o predicție privind tăriile pe care forțele trebuie să le aibă la energiile experimentelor actuale, predicție care s-a dovedit a fi într-un acord rezonabil cu experimentul. Acesta e doar un singur succes cantitativ, dar e suficient pentru a ne îndreptăți speranțele că aceste idei conțin un sâmbure de adevăr.

Pe această cale a fost de asemenea posibilă estimarea energiei la care tăriile intrinseci ale forțelor devin egale. La energiile acceleratoarelor existente, forța nucleară tare e mult mai puternică decât celelalte forțe și, conform cromodinamicii cuantice, scade foarte încet odată cu creșterea energiei, așa încât energia la care toate forțele din modelul standard au tării egale trebuie să fie foarte înaltă: valoarea prezisă pentru ea este de un milion de miliarde de miliarde de volți. (Calculule mai recente arată că energia se apropie de zece milioane de miliarde de miliarde de volți.) Dacă există într-adevăr o simetrie spontan ruptă care să lege forța tare

de forța electrolabă, atunci ar trebui să existe noi particule grele care să completeze familia particulelor purtătoare de forță alături de particulele W și Z , fotoni și gluoni. În acest caz, energia de câteva milioane de miliarde de miliarde de volți ar putea fi identificată cu energia conținută în masa acestor noi particule grele. După cum vom vedea, în actualele teorii ale supercorzilor nu e nevoie să presupunem existența unei noi simetrii distincte care leagă forța tare și forța electrolabă, dar rămâne valabil faptul că tăriile intrinseci ale forțelor tare și electrolabă trebuie să fie egale la o energie foarte înaltă, estimată la aproximativ zece milioane de miliarde de miliarde de volți.

Acesta ar putea părea doar încă un număr neverosimil de mare printre atâtea altele, dar în 1974, când a fost făcută această estimare de un milion de miliarde de miliarde de volți, ea a trezit interesul fizicienilor teoreticieni. Cunoaștem cu toții o altă energie foarte mare, care apare în mod firesc în orice teorie ce încearcă să unifice gravitația cu celelalte forțe din natură. În condiții obișnuite, forța gravitațională e mult mai slabă decât forțele slabă, tare și electromagnetică. Nimeni nu a observat vreodată efectul forțelor gravitaționale între particule în cadrul unui atom sau al unei molecule, și nu putem spera că acest lucru se va întâmpla vreodată. (Singurul motiv pentru care gravitația ni se pare o forță destul de puternică în viața de zi cu zi este acela că Pământul conține un mare număr de atomi, fiecare aducând o contribuție infimă la câmpul gravitațional de la suprafața Pământului.) Dar, conform relativității generale, gravitația e produsă de energie, la fel cum e produsă de masă, și acționează asupra energiei, la fel cum acționează asupra masei. De aceea fotonii, care au energie dar nu au masă, sunt deviați de câmpul gravitațional al Soarelui. La energii suficient de mari forțele gravitaționale dintre două particule elementare tipice devin la fel de intense ca orice altă forță dintre ele. Energia la care se întâmplă acest lucru e de aproximativ o mie de milioane de miliarde de miliarde de volți. Aceasta poartă numele de energia Planck*.

* În 1899, Max Planck a remarcat că de fapt aceasta e unitatea naturală de energie care poate fi calculată cunoscând viteza luminii, constanta care avea mai târziu să-i poarte numele și constanta din formula lui Newton pentru forța gravitațională. (N.a.)

E frapant faptul că energia Planck este doar de aproximativ o sută de ori mai mare decât energia la care tăriile intrinseci ale forțelor tare și electroslabă devin egale, chiar dacă ambele energii sunt enorme în comparație cu energiile întâlnite în mod curent în fizica particulelor elementare. Faptul că aceste două uriașe energii sunt relativ apropiate sugerează că ruperea simetriei care unește forța tare și forța electroslabă e doar o parte dintr-o rupere de simetrie mai profundă: ruperea acelei simetrii care leagă gravitația de celelalte forțe din natură. S-ar putea să nu existe o teorie unificată separată a forțelor tare, slabă și electromagnetică, ci numai o teorie cu adevărat unificată care cuprinde forța gravitațională alături de cea tare, slabă și electromagnetică.

Din păcate, gravitația nu e inclusă în modelul standard fiindcă e foarte dificil să descrii gravitația în limbajul teoriei cuantice a câmpului. Putem aplica pur și simplu regulile mecanicii cuantice la ecuațiile de câmp ale relativității generale, dar atunci ajungem la vechea problemă a infinitilor. De pildă, dacă încercăm să calculăm probabilitățile pentru ce se întâmplă în ciocnirea a doi gravitoni (particulele care alcătuiesc câmpul gravitațional), obținem contribuții perfect plauzibile pentru schimbul unui graviton între gravitonii care se ciocnesc, dar dacă ducem calculele cu un pas mai departe și luăm în considerare schimbul a doi gravitoni, dăm peste probabilități infinite. Acești infiniti se pot anula dacă modificăm ecuațiile de câmp ale lui Einstein introducând un nou termen cu factor constant infinit, care anulează primul infinit, dar, dacă includem apoi în calcule schimbul a *trei* gravitoni, dăm peste noi infiniti, care la rândul lor pot fi anulați adăugând încă alți termeni la ecuațiile de câmp și așa mai departe, până când ajungem la o teorie cu un număr nelimitat de constante necunoscute. O asemenea teorie e într-adevăr utilă pentru calculul proceselor cuantice la energii relativ joase, caz în care noii termeni adăugați la ecuațiile de câmp sunt neglijabili, dar își pierde orice putere de predicție atunci când o aplicăm fenomenelor gravitaționale la energia Planck. Deocamdată, calculul proceselor fizice la energia Planck depășește pur și simplu posibilitățile noastre.

Desigur, nimeni nu studiază experimental procese la energia Planck (și, de fapt, nu măsoară vreun proces gravitațional cum e

ciocnirea graviton-graviton la nici o energie), dar, pentru ca o teorie să fie acceptabilă, ea nu trebuie numai să concorde cu rezultatele experimentelor efectuate deja, ci să facă și predicții cel puțin plauzibile pentru experimente care în principiu ar putea fi efectuate. În această privință, relativitatea generală a fost ani de-a rândul în aceeași situație ca teoria interacțiilor slabe înaintea elaborării teoriei electrolabe la sfârșitul anilor '60: relativitatea generală funcționează foarte bine de fiecare dată când e testată experimental, dar conține contradicții interne care arată că trebuie modificată.

Valoarea energiei Planck ne pune în fața unei noi dificultăți. Problema nu e că această energie este atât de mare, ci că apare în fizică la un nivel atât de profund încât putem presupune că energia Planck e unitatea fundamentală de energie care apare în ecuațiile teoriei finale. Misterul e: *de ce sunt toate celelalte energii atât de mici?* În particular, în versiunea inițială a modelului standard, masele electronului, particulelor W și Z și ale tuturor cuarcilor sunt proporționale cu singura masă care apare în ecuațiile modelului, masa particulei Higgs. Din câte știm despre masele particulelor W și Z , putem deduce că energia masei unei particule Higgs nu poate fi mai mare decât aproximativ un bilion de volți. Dar aceasta e de cel puțin o sută de milioane de milioane de ori mai mică decât energia Planck. Asta înseamnă de asemenea că există o ierarhie a simetriilor: oricare ar fi cea simetrie care unește forța gravitațională, cea tare și cea electrolabă, ea este ruptă la o energie de aproximativ o sută de milioane de milioane de ori mai mare decât energia la care e ruptă simetria care unifică interacția slabă cu cea electromagnetică. Dificultatea de a explica această diferență enormă între energiile fundamentale e cunoscută în fizica actuală a particulelor elementare sub numele de *problema ierarhiei*.

De peste cincisprezece ani problema ierarhiei a reprezentat un os în gâtul fizicienilor teoreticieni. Multe din speculațiile teoretice din ultimii ani au fost generate de nevoia de a rezolva această problemă. Nu e un paradox – nu există vreun motiv pentru care unele energii din ecuațiile fundamentale ale fizicii *nu* ar putea fi de sute de milioane de milioane de ori mai mici decât altele –, ci un mister. Asta face ca problema să fie atât de dificilă. Un paradox,

cum ar fi o crimă într-o cameră încuiată, poate sugera singur soluția, dar un mister ne obligă să căutăm indicii în afara problemei înseși.

Una din abordările problemei ierarhiei se bazează pe ideea unui nou tip de simetrie, numită *supersimetrie*, care leagă particule cu spini diferiți pentru a forma noi „superfamilii“. În teoriile supersimetrice există mai multe particule Higgs, dar simetria interzice apariția masei vreunei particule Higgs în ecuațiile fundamentale ale teoriei; ceea ce în modelul standard numim masele particulelor Higgs ar trebui să apară din complicatele efecte dinamice care rup supersimetria. Într-o altă abordare menționată mai sus, renunțăm la ideea unui câmp a cărui valoare de vid rupe simetria electrolabă, iar în schimb punem această rupere a simetriei pe seama efectelor unei noi forțe extra-tari.

Din păcate, nu există deocamdată vreun semn al supersimetriei sau al noilor forțe extra-tari în natură. Acest fapt nu reprezintă însă un argument decisiv împotriva acestor idei; noile particule prezise de aceste abordări ale problemei ierarhiei ar putea fi prea grele pentru a fi produse în acceleratoarele existente în prezent.

Ne așteptăm ca particulele Higgs sau alte noi particule preconizate de diversele abordări ale problemei ierarhiei să fie descoperite cu noi acceleratoare de particule suficient de puternice, cum ar fi superacceleratorul supraconductor. Dar e imposibil ca un accelerator pe care ni-l putem deocamdată închipui să concentreze la nivelul particulelor individuale energiile enorme la care toate forțele să fie unificate. Când făceau la Abdera speculații asupra atomilor, Democrit și Leucip nu puteau bănuși că acești atomi erau de un milion de ori mai mici decât firele de nisip de pe țărmurile Mării Egee, sau că vor trece 2300 de ani până la punerea directă în evidență a existenței atomilor. Speculațiile noastre ne-au adus acum pe țărmul unui golf mult mai larg: credem că toate forțele din natură sunt unificate la o energie de ordinul energiei Planck, de un milion de miliarde de ori mai mare decât cea mai mare energie atinsă în acceleratoarele de azi.

Descoperirea acestui imens golf a transformat profund fizica – ea nu implică doar problema ierarhiei. De pildă, a aruncat o lumină nouă asupra vechii probleme a infinitului. În modelul standard, ca și în prima versiune a electrodinamicii cuantice, emisia și absorbția fotonilor și a altor particule de energie nelimitată aduce contribuții

infinite la energiile atomice și la alte mărimi observabile. Pentru a scăpa de acești infiniți, asupra modelului standard se impunea condiția de a fi renormabil – toți infiniții din teorie să fie anulați de alți infiniți care apar în definirea maselor goale și a altor constante ce intră în ecuațiile teoriei. Această condiție a reprezentat un îndrumar eficient în construirea modelului standard; doar teoriile cu cele mai simple ecuații de câmp sunt renormabile. Dar, deoarece modelul standard lasă deoparte gravitația, credem acum că el reprezintă doar o aproximație la energii joase a unei teorii unificate cu adevărat fundamentale și că el încetează să mai fie valabil la energii cum este energia Planck. Atunci de ce ar trebui să luăm în serios ce ne spune el despre efectele emisiei și absorbției particulelor de energie nelimitată? Iar dacă nu luăm în serios, de ce am cere ca modelul standard să fie renormabil? Nu am scăpat de problema infiniților, dar ea ține de teoria finală, nu de o aproximație la energii joase cum e modelul standard.

În urma acestei reconsiderări a problemei infiniților, credem acum că ecuațiile de câmp ale modelului standard nu sunt de acel tip foarte simplu care e renormabil, ci conțin de fapt fiecare termen imaginabil care e compatibil cu simetriile teoriei. Dar atunci trebuie să explicăm de ce vechile teorii cuantice de câmp renormabile, cum ar fi cele mai simple versiuni ale electrodinamicii cuantice sau modelul standard, au dat rezultate atât de bune. Motivul, credem noi, își poate afla originea în faptul că toți termenii ecuațiilor de câmp, cu excepția termenilor foarte simpli renormabili, apar cu necesitate în aceste ecuații împărțiți la puteri a ceva de tipul energiei Planck. Efectul acestor termeni asupra oricărui proces fizic observat va fi în acest caz proporțional cu puteri ale raportului dintre energia procesului și energia Planck, raport probabil nu mai mare de o milionime de miliardime. E un număr atât de mic încât e normal ca nici un astfel de efect să nu fi fost detectat. Cu alte cuvinte, condiția de renormabilitate, care ne-a îndrumat de la electrodinamica cuantică a anilor '40 până la modelul standard al anilor '60 și '70, a fost condiția corectă pentru scopuri practice, dar a fost impusă din considerente care acum nu ni se mai par relevante.

Această modificare de perspectivă are consecințe care se pot dovedi foarte importante. Modelul standard în forma sa renormabilă cea mai simplă avea anumite legi de conservare „accidentale“,

dincolo de legile de conservare cu adevărat fundamentale ce rezultă din simetriile relativității speciale și din simetriile interne care impun existența fotonului, particulelor W și Z și gluonilor. Între aceste legi de conservare accidentale se află conservarea numărului de cuarci (numărul total de cuarci minus numărul total de anticuarci) și a numărului de leptoni (numărul total de electroni, neutrini și particule înrudite minus numărul total al antiparticulelor lor). Când enumerăm toți termenii posibili din ecuațiile de câmp care sunt compatibili cu simetriile fundamentale ale modelului standard și cu condiția de renormabilitate, găsim că nu există nici un termen în ecuațiile de câmp care ar putea viola aceste legi de conservare. Conservarea numărului de cuarci și de leptoni este cea care interzice procese cum ar fi dezintegrarea celor trei cuarci dintr-un proton într-un pozitron și un foton, iar astfel această lege de conservare asigură stabilitatea materiei obișnuite. Dar acum credem că termenii complicați, nerenormabili, din ecuațiile de câmp, care ar putea viola conservarea numărului de cuarci și leptoni, există într-adevăr, dar sunt extrem de mici. Acești termeni mici din ecuațiile de câmp ar putea face ca protonul să se dezintegreze (de exemplu într-un pozitron și un foton sau altă particulă neutră), dar cu o perioadă de înjumătățire foarte lungă, estimată inițial la aproximativ o sută de milioane de milioane de milioane de milioane de milioane de ani, sau poate ceva mai lungă sau mai scurtă. Acest număr de ani este aproximativ egal cu numărul de protoni din 100 de tone de apă, deci, dacă fenomenul e real, atunci în medie, în 100 de tone de apă, într-un an se dezintegrează aproximativ un proton. S-a încercat timp de mai mulți ani fără succes punerea în evidență pe cale experimentală a dezintegrării protonului, dar în curând va exista în Japonia un rezervor de zece mii de tone de apă în care vor fi urmărite eventualele scindilații care să indice dezintegrările protonilor. Poate că acest experiment va da rezultate.*

* Într-adevăr, dispozitivul experimental amplasat într-o mină din regiunea Kamioka a intrat în funcțiune în 1996 și în 1998 s-a obținut un rezultat spectaculos, dar nu cel așteptat de Weinberg: s-a determinat pentru prima oară o limită inferioară pentru masa neutrinelui. Cu alte cuvinte, neutrinii nu sunt particule cu masă nulă, așa cum s-a crezut multă vreme. (*N. red.*)

Între timp au apărut indicii tulburătoare privind o posibilă violare a legii conservării numărului de leptoni. În modelul standard această lege de conservare e răspunzătoare pentru faptul că neutrinii au masă nulă, iar, dacă această lege de conservare e violată, e de așteptat ca neutrinii să aibă mase mici, între o sutime și o miime de volt (cu alte cuvinte, aproximativ o miliardime din masa electronului). Această masă e mult prea mică pentru a fi observată în experimentele de până acum, dar ar putea avea un efect subtil, permițând neutrinelor de tip electronic (adică membri ai aceleiași familii cu electronul) să se transforme încet în neutrini de alt tip. Aceasta ar putea explica un vechi mister, faptul că în radiația solară sunt detectați mai puțini neutrini decât ar fi de așteptat. Neutrinii produși în centrul Soarelui sunt în principal de tip electronic, iar detectorii utilizați pe Pământ pentru observarea lor sunt sensibili în primul rând la neutrini de tip electronic, deci s-ar putea ca unii dintre neutrinii electronici să se fi transformat la trecerea prin Soare în alte tipuri de neutrini. Experimente pentru testarea acestei idei folosind diferite tipuri de detectori de neutrini sunt efectuate în prezent în Dakota de Sud, Japonia, Caucaz, Italia și Canada.

Dacă avem noroc, putem totuși descoperi dovezi clare pentru dezintegrarea protonului sau masa neutrinelor. Or, acceleratoarele existente, cum sunt cele de la Fermilab și CERN, pot aduce probe în favoarea supersimetriei. Dar toate acestea înaintază în ritm de melc. Luările de cuvânt care rezumă conferințele de fizica energiilor înalte din ultimul deceniu ar oferi mereu aceeași listă de posibile descoperiri – și în general au făcut-o. Lucrurile nu mai sunt atât de palpante ca odinioară, când în fiecare lună studenții alergau pe coridoarele facultăților de fizică pentru a aduce vestea unei noi descoperiri. Doar importanța fundamentală a fizicii particulelor elementare face ca studenți străluciți să-și dorească să lucreze într-un domeniu în care prea puține se întâmplă.

Am putea spera să depășim acest impas dacă superacceleratorul supraconductor ar intra în funcțiune. El a fost proiectat să atingă o energie suficient de înaltă pentru a tranșa problema mecanismului de rupere a simetriei electrolabe, fie prin descoperirea uneia sau mai multor particule Higgs, fie dezvăluind indicii privind existența unor noi forțe tari. Dacă răspunsul la problema ierarhiei e

supersimetria, atunci și acest lucru ar fi pus în evidență de superaccelerator. Pe de altă parte, dacă ar fi descoperite noi forțe tari, superacceleratorul ar produce o mare diversitate de noi particule cu mase de aproximativ un bilion de volți, care ar trebui explorate pentru a putea emite apoi ipoteze în legătură cu ce se întâmplă la energiile mult mai înalte la care toate forțele, inclusiv gravitația, sunt unificate. În ambele situații, fizica particulelor ar progresa. Campania fizicienilor în favoarea superacceleratorului a fost declanșată de un sentiment de disperare – numai datele furnizate de un asemenea accelerator ne pot da certitudinea că munca noastră va continua.

CAPITOLUL IX

Forma unei teorii ultime

*Dar dacă știți citi-n sămânța vremii
Spunând ce bob dă rod, ce bob e sterp,
Vorbiți-mi.*

WILLIAM SHAKESPEARE, *Macbeth*

De teoria finală s-ar putea să ne despartă secole și ea ar putea fi complet diferită de tot ce ne închipuim acum. Dar să presupunem pentru o clipă că ne așteaptă chiar după colț. Cum ne-o putem imagina pe baza celor cunoscute deja?

Partea din fizica actuală care cred că e probabil să supraviețuiască nemodificată într-o teorie finală e mecanica cuantică. Aceasta nu numai pentru că mecanica cuantică stă la baza întregului nostru mod de a înțelege materia și forța și a trecut teste experimentale extrem de severe; mai important e faptul că nimeni nu a putut găsi o cale de a modifica mecanica cuantică, așa încât să-i păstreze succesele fără a se ajunge la absurdități logice.

Deși mecanica cuantică oferă scena pe care se desfășoară toate fenomenele naturale, în sine ea e o scenă goală. Mecanica cuantică ne permite să închipuim o diversitate colosală de posibile sisteme fizice: sisteme alcătuite din orice fel de particule, interacționând prin orice fel de forțe, ba chiar sisteme care nu sunt alcătuite din particule. Istoria fizicii din acest secol a fost marcată de întărirea treptată a convingerii că principiile de simetrie dictează personajele dramei pe care o observăm pe scena cuantică. Actualul nostru model standard al forțelor slabe, electromagnetice și tari se bazează pe simetrii: simetriile spațio-temporale ale relativității speciale, care impun ca modelul standard să fie formulat ca o teorie de câmp, și simetriile interne care dictează existența câmpului electromagnetic și a celorlalte câmpuri purtătoare de forțe din modelul standard. Gravitația, de asemenea, poate fi înțeleasă pe baza unui principiu

de simetrie, simetria din teoria relativității generale, care stabilește că legile naturii trebuie să fie invariante în raport cu toate schimbările posibile ale felului în care descriem pozițiile în spațiu și timp.

Pornind de la experiența acestui secol, se presupune în general că o teorie finală se va baza pe principii de simetrie. Ne așteptăm ca aceste simetrii să unifice gravitația cu forța slabă, electromagnetică și tare din modelul standard. Dar vreme de decenii nu am știut care sunt aceste simetrii și nu am avut nici o teorie cuantică a gravitației matematic acceptabilă care să încorporeze simetria ce stă la baza relativității generale.

S-ar putea ca acum lucrurile să se fi schimbat. În deceniul trecut a apărut un cadru nou pentru teoria cuantică a gravitației și chiar pentru tot restul – teoria corzilor. Teoria corzilor s-a dovedit a fi primul nostru candidat plauzibil pentru o teorie finală.*

Începuturile acestei teorii datează din 1968, când unii teoreticieni încercau să înțeleagă forțele nucleare tari fără să facă apel la teoriile cuantice de câmp, ceea ce la vremea aceea era o dovadă de curaj. Un tânăr teoretician de la CERN, Gabriele Veneziano, a avut ideea de a ghici pur și simplu o formulă care să dea probabilitățile împrăstierii a două particule la diferite energii și unghiuri, și care să aibă anumite proprietăți generale impuse de principiile relativității și ale mecanicii cuantice. Folosind un aparat matematic obișnuit, pe care fizicienii îl dobândesc din facultate, el a putut construi o formulă uimitor de simplă care satisfăcea toate aceste condiții. Formula lui Veneziano a atras atenția; ea a fost imediat generalizată de câțiva teoreticieni pentru alte procese și a stat la baza unei scheme de aproximare sistematice. În acel moment nimeni nu se gândea la vreo posibilă aplicare la o teorie cuantică a gravitației; aceste cercetări nu urmăreau decât înțelegerea forțelor nucleare tari. (Adevărata teorie a forțelor tari, teoria cuantică a câmpului cunoscută sub numele de cromodinamică cuantică, urma să fie descoperită câțiva ani mai târziu.)

* Pentru o prezentare mai amănunțită și în același timp accesibilă a teoriei corzilor, vezi cartea lui Brian Greene *Universul elegant* (Humanitas, 2008). (N. red.)

În cursul acestor cercetări, s-a dovedit că formula lui Veneziano, extinderile și generalizările ei nu erau simple ghiceli norocoase, ci teoria unui nou tip de entitate fizică, o *coardă* cuantică relativistă. Desigur, corzile obișnuite sunt alcătuite din particule precum protonii, neutronii și electronii, dar aceste noi corzi sunt diferite; *ele* sunt chiar acele lucruri din care se presupune că sunt alcătuiți protonii și neutronii. De fapt, nu s-a întâmplat ca cineva să aibă inspirația subită că materia e alcătuită din corzi și apoi să elaboreze o teorie bazată pe această idee; teoria corzilor a fost descoperită înainte să ne dăm seama că *era într-adevăr* o teorie a corzilor.

Ne putem închipui aceste corzi ca pe niște minuscule încrețituri unidimensionale în textura netedă a spațiului. Corzile pot fi deschise, cu două capete libere, sau închise, ca o bandă de cauciuc. În timp ce zboară prin spațiu, corzile vibrează. Fiecare coardă se poate afla în oricare din infinitatea de stări (sau *moduri*) de vibrație, asemănătoare cu armonicele produse de vibrația unui diapazon sau a unei corzi de vioară. Vibrațiile unei corzi de vioară obișnuite se sting cu timpul, pentru că energia de vibrație dintr-o coardă de vioară tinde să fie convertită în mișcarea haotică a atomilor din care e alcătuită coarda de vioară, mișcare pe care o percepem sub formă de căldură. Dimpotrivă, corzile care ne interesează pe noi aici sunt cu adevărat fundamentale și continuă să vibreze la nesfârșit; ele nu sunt alcătuite din atomi sau din altceva, iar energia lor de vibrație nu are unde să se disipe.

Se presupune că dimensiunile corzilor sunt foarte mici, astfel încât, dacă observăm o coardă fără să sondăm distanțe foarte mici, ea apare ca o particulă punctiformă. Deoarece coarda se poate afla în oricare dintr-un număr infinit de moduri de vibrație posibile, ea apare ca o particulă ce poate aparține oricăreia dintr-un număr infinit de specii posibile, speciile corespunzând modului în care vibrează coarda.

Primele versiuni ale teoriei corzilor s-au confruntat cu dificultăți. Calculele au arătat că între modurile de vibrație în număr infinit ale unei corzi închise există un mod în care coarda apare ca o particulă cu masă zero și spin dublu față de cel al fotonului. Să ne amintim că teoriile corzilor s-au născut din eforturile lui Veneziano de a înțelege forțele nucleare tari, iar aceste teorii ale corzilor

au fost inițial concepute ca teorii ale forțelor tari și ale particulelor asupra cărora ele acționează. Nu se cunoaște nici o particulă, dintre cele ce simt efectele forțelor nucleare tari, care să aibă asemenea masă și spin, și, admitând că ar exista, era de așteptat ca această particulă să fi fost de mult descoperită – prin urmare, apărea o gravă contradicție cu experimentul.

Și totuși *există* o particulă cu masă zero și spin dublu față de spinul fotonului. Nu e o particulă care simte forțele nucleare tari; este gravitonul, particula radiației gravitaționale. Mai mult, se știa din anii '60 că orice teorie a unei particule având acest spin și această masă trebuie să semene cu relativitatea generală. Particula de masă nulă care fusese descoperită teoretic în perioada de început a teoriei corzilor se deosebea de adevăratul graviton într-o singură privință importantă: prin schimbul acestor noi particule de masă nulă s-ar fi produs forțe asemănătoare celor gravitaționale, dar de o sută de bilioane de bilioane de bilioane de ori mai puternice.

Așa cum se întâmplă deseori în fizică, teoreticienii corzilor descoperiseră soluția corectă a unei probleme greșite. La începutul anilor '80 a câștigat treptat teren ideea că noua particulă de masă nulă descoperită ca o consecință matematică a teoriei corzilor nu era vreun analog al gravitonului care să interacționeze prin forța nucleară tare, ci era chiar adevăratul graviton. Pentru a da forțelor gravitaționale tăria corectă, trebuia crescută tensiunea din corzi în ecuațiile fundamentale ale teoriei atât de mult, încât diferența dintre starea cu energia cea mai joasă și cea imediat următoare să nu reprezinte o energie de doar câteva sute de milioane de volți, tipică pentru fenomenele nucleare, ci ceva de ordinul energiei Planck, un milion de milioane de milioane de miliarde de volți, la care gravitația devine la fel de intensă ca și celelalte forțe*. Această energie este atât de mare, încât toate particulele din modelul standard – toți cuarcii, fotonii, gluonii etc. – trebuie identificate cu cele mai joase moduri de vibrație ale corzilor; altminteri, ar fi fost nevoie de prea multă energie pentru a le produce și nu le-am fi descoperit niciodată.

* Amintiți-vă că voltul, folosit ca unitate de energie, reprezintă energia dobândită de un electron ce se deplasează printr-un conductor de la un pol la altul al unei baterii de un volt. (*N.a.*)

Din această perspectivă, o teorie cuantică de câmp cum e modelul standard e aproximația la energie joasă a unei teorii fundamentale care nu e o teorie de câmp, ci o teorie a corzilor. Credem acum că asemenea teorii cuantice de câmp dau rezultate atât de bune pentru energiile accesibile în acceleratoarele moderne nu pentru că natura ar fi descrisă în mod fundamental de o teorie cuantică de câmp, ci pentru că *orice* teorie care satisface condițiile mecanicii cuantice și relativității speciale arată ca o teorie cuantică de câmp la energii suficient de joase. Privim din ce în ce mai mult modelul standard ca pe o *teorie de câmp eficientă*, adjectivul „eficientă” amintindu-ne că asemenea teorii sunt doar aproximații la energie joasă ale unei teorii foarte diferite, poate o teorie a corzilor. Modelul standard s-a aflat în centrul fizicii moderne, dar această schimbare de atitudine în privința teoriilor cuantice de câmp ar putea marca începutul unei ere noi, postmoderne, în fizică.

Din moment ce teoriile corzilor includ gravitoni și o mulțime de alte particule, ele au oferit pentru prima dată baza unei posibile teorii finale. Într-adevăr, deoarece gravitonul pare să fie o trăsătură inevitabilă a oricărei teorii a corzilor, putem spune că teoria corzilor explică de ce există gravitația. Edward Witten, care avea să devină un teoretician de frunte al corzilor, a aflat despre acest aspect al teoriilor corzilor în 1982, dintr-un articol de sinteză scris de John Schwarz de la CalTech, și a considerat această revelație „cea mai intensă trăire intelectuală a vieții mele”.

Teoriile corzilor par să fi rezolvat și problema infiniților care a zădărnicit toate încercările anterioare de a formula o teorie cuantică a gravitației. Deși corzile pot arăta ca particule punctiforme, cel mai important lucru în legătură cu ele este că *nu* sunt puncte, ci obiecte extinse. Infiniții din teoriile cuantice de câmp obișnuite apar pentru că de fapt câmpurile descriu particule punctiforme. (De pildă, legea inversului pătratului dă o forță infinită dacă așezăm doi electroni punctiformi în același loc.) Pe de altă parte, teoriile corzilor formulate corect par să nu conțină infinituri.

Interesul pentru teoriile corzilor a început cu adevărat să crească în 1984, când Schwarz împreună cu Michael Green de la Queen Mary College din Londra au demonstrat că două teorii particulare ale corzilor au trecut testul coerenței matematice pe care teoriile

corzilor studiate până atunci nu-l trecuseră. Cea mai interesantă idee din lucrarea lui Green și Schwarz a fost că teoriile corzilor au acea rigiditate pe care o pretindem de la o teorie cu adevărat fundamentală – deși putem concepe un număr mare de teorii diferite ale corzilor deschise, se părea că numai două dintre ele au sens matematic. Entuziasmul stârnit de teoriile corzilor a atins apogeul atunci când o echipă de teoreticieni a demonstrat că limita la energii joase a uneia dintre cele două teorii Green-Schwarz semăna izbitor cu actualul model standard al forțelor slabe, tari și electromagnetice, iar o altă echipă („Cvartetul de corzi de la Princeton“) a găsit alte câteva teorii ale corzilor care semănau și mai bine cu modelul standard. Mulți teoreticieni au început să creadă că o teorie ultimă era pe aproape.

De atunci entuziasmul a scăzut întrucâtva. Se știe acum că există mii de teorii ale corzilor coerente matematic, la fel ca teoriile Green-Schwarz. Toate aceste teorii satisfac aceeași simetrie fundamentală, numită *simetrie conformă*, dar această simetrie nu provine din observarea naturii, ca principiul relativității al lui Einstein; simetria conformă pare să fie necesară pentru a garanta coerența cuantică a acestor teorii. Din această perspectivă, miile de teorii particulare ale corzilor nu reprezintă decât diferite moduri de a satisface cerințele simetriei conforme. Se crede în general că aceste teorii diferite ale corzilor nu sunt cu adevărat teorii diferite, ci doar reprezentări diferite ale aceleiași teorii de bază. Dar nu suntem siguri de acest lucru și nimeni nu știe care ar putea fi acea teorie de bază.*

Fiecare dintre miile de „teorii“ individuale ale corzilor are propriile ei simetrii spațio-temporale. Unele satisfac principiul relativității al lui Einstein; altele nu au nici măcar ceea ce am putea

* În 1995 Edward Witten, analizând relațiile care leagă între ele diferitele teorii ale corzilor, a emis ipoteza că în spatele lor s-ar afla o teorie pe care a botezat-o „teoria M“, față de care toate celelalte teorii sunt aproximații. Între caracteristicile acestei presupuse teorii ultime se numără și faptul că obiectele cu care operează nu sunt numai corzi (unidimensionale), ci și membrane (bidimensionale) și în general p-brane (p-dimensionale), adică generalizări ale corzilor în mai multe dimensiuni. Pentru o prezentare a acestei „a doua revoluții“ din teoria corzilor, vezi cartea lui Brian Greene *Universul elegant*. (N. red.)

recunoaște ca spațiu tridimensional obișnuit. Fiecare teorie a corzilor are de asemenea propriile ei simetrii interne, de același tip general cu simetriile interne care stau la baza actualului model standard al forțelor slabe, electromagnetice și tari. Dar o diferență esențială între teoriile corzilor și toate celelalte teorii precedente este că spațiul-timp și simetriile interne nu sunt introduse artificial; ele sunt consecințe matematice ale modului particular în care regulile mecanicii cuantice (și deci ale simetriei conforme) sunt satisfăcute în fiecare teorie a corzilor în parte. Prin urmare, teoriile corzilor pot reprezenta un mare pas înainte spre explicarea rațională a naturii. Ele ar putea fi de asemenea cele mai bogate matematic teorii coerente compatibile cu principiile mecanicii cuantice și singurele care încorporează gravitația.

În zilele noastre, o mare parte dinter tinerii fizicieni teoreticieni lucrează în domeniul teoriei corzilor. Au apărut și unele rezultate încurajatoare. De pildă, în teoriile corzilor e normal ca tăriile intrinseci ale forței tari și forței electrosrobe să fie egale la o energie foarte înaltă, legată de tensiunea în coardă, chiar dacă nu există o simetrie separată care unifică aceste forțe. Dar până acum nu au apărut predicții cantitative detaliate care să permită testarea decisivă a teoriei corzilor.*

Acest impas a condus la o nefericită scindare în comunitatea fizicienilor. Teoria corzilor este foarte solicitantă; puțini dintre

* Toate predicțiile cantitative făcute până în prezent presupun energii mult mai mari decât cele accesibile în laborator. S-au făcut și predicții calitative, legate de pildă de posibilitatea apariției anumitor fenomene cosmice observabile, dar deocamdată nu există dovezi experimentale în sprijinul teoriei corzilor. Witten consideră totuși că teoria corzilor a făcut deja o predicție valabilă: existența gravitației, înțelegând prin asta felul natural în care apare gravitația în teoria corzilor, fără nici o presupunere suplimentară. E interesant de observat că argumentul lui Witten (aparent șocant) seamănă mult cu afirmația lui Weinberg privind superioritatea relativității generale asupra teoriei newtoniene a gravitației: legea inversului pătratului nu e arbitrară, ci rezultă din proprietățile spațiului-timp. Cu alte cuvinte, prima teorie este mai rigidă (lasă mai puțin loc pentru arbitrar) decât a doua. Din păcate, existența mai multor variante ale teoriei corzilor știrbește această rigiditate visată de Weinberg, și abia găsirea teoriei M ar putea s-o refacă pe deplin. (N. red.)

teoreticienii care se ocupă de alte probleme au cunoștințele de fond necesare înțelegerii articolelor tehnice despre teoriile corzilor, iar puțini dintre teoreticienii corzilor au timp să se țină la curent cu restul cercetărilor din fizică, și cu atât mai puțin cu experimentele la energii înalte. Unii dintre colegii mei au reacționat în această nefericită criză cu oarecare ostilitate față de teoria corzilor. Nu le împărtășesc părerea. Teoria corzilor oferă singura noastră sursă actuală de candidați la o teorie ultimă – cum să ne așteptăm ca mulți dintre tinerii fizicieni străluciți să *nu* lucreze în acest domeniu? E păcat că până acum n-a avut mai mult succes, dar teoreticienii corzilor, la fel ca toți ceilalți, fac mari eforturi într-un moment foarte dificil din istoria fizicii. Nu ne rămâne decât să sperăm fie că teoria corzilor va avea mai mult succes, fie că noi experimente vor deschide alte direcții.

Din nefericire, nimeni nu a găsit încă o anume teorie a corzilor care să se potrivească exact cu spațiul-timp, cu simetriile interne și cu lista cuarcilor și leptonilor pe care le întâlnim în natură. Mai mult, încă nu știm cum să catalogăm posibilele teorii ale corzilor și să le evaluăm proprietățile. Pentru a rezolva aceste probleme se pare că trebuie să inventăm noi metode de calcul, dincolo de tehnicile care au funcționat atât de bine în trecut. În electrodinamica cuantică, de pildă, putem calcula efectul schimbului a doi fotoni între electronii din atom ca pe o mică corecție a efectului schimbului unui foton, iar apoi putem calcula efectul schimbului a trei fotoni ca pe o și mai mică corecție și așa mai departe, oprindu-ne din calcul atunci când corecțiile rămase sunt prea mici pentru a prezenta interes. Această metodă de calcul se numește teoria perturbațiilor. Problemele cruciale din teoria corzilor implică însă schimbul unui număr infinit de corzi, deci nu pot fi abordate prin teoria perturbațiilor.

Dar lucrurile stau și mai rău. Chiar dacă am ști să tratăm matematic aceste teorii ale corzilor și am putea-o identifica pe cea care corespunde realității observate în natură, nu avem deocamdată nici un criteriu care să ne permită să spunem *de ce* acea teorie a corzilor este cea care se aplică lumii reale. Repet: scopul fizicii la nivelul ei cel mai profund nu e doar acela de a descrie lumea, ci de a explica de ce este așa cum este.

În căutarea unui criteriu care să ne permită să alegem adevărata teorie a corzilor, am putea fi obligați să invocăm un principiu cu un statut dubios în fizică, numit *principiul antropic*, care afirmă că legile naturii trebuie să permită existența unor ființe inteligente care să-și poată pune întrebări despre legile naturii.

Ideea de principiu antropic s-a născut din observația că legile naturii par surprinzător de bine potrivite pentru existența vieții. Un exemplu faimos e dat de sinteza elementelor. În conformitate cu ideile moderne, această sinteză a început când universul avea o vârstă de aproximativ trei minute (înainte de aceasta era prea fierbinte pentru ca protonii și neutronii să se lege împreună spre a forma nuclee atomice) și a continuat mai târziu în stele. Inițial s-a crezut că elementele s-au format prin adăugarea câte unei particule nucleare la nucleele atomice, începând cu elementul cel mai simplu, hidrogenul, al cărui nucleu constă dintr-o singură particulă (un proton). Dar, deși nu apărea nici o dificultate la construirea nucleelor de heliu, care conțin patru particule nucleare (doi protoni și doi neutroni), nu există nici un nucleu stabil cu cinci particule nucleare și deci nici o posibilitate de a face pasul următor. Soluția găsită în cele din urmă de Edwin Salpeter în 1952 este că, în interiorul stelelor, două nuclee de heliu se pot apropia pentru a forma nucleul instabil al izotopului beriliu-8, care înainte de a fisiona în două nuclee de heliu poate absorbi încă un nucleu de heliu pentru a forma un nucleu de carbon. Dar, așa cum a subliniat în 1954 Fred Hoyle, pentru ca procesul să poată explica abundența observată a carbonului în cosmos, trebuie să existe o stare a nucleului de carbon cu o energie care să dea o probabilitate extrem de mare de formare a acelei stări la ciocnirea unui nucleu de heliu cu un nucleu de beriliu-8. (Exact o asemenea stare a fost găsită ulterior de experimentatorii care au lucrat împreună cu Hoyle.) Odată format carbonul în stele, nu există nici un obstacol în producerea tuturor elementor mai grele, inclusiv a celor necesare formelor de viață cunoscute, precum oxigenul și azotul. Dar pentru ca schema să funcționeze, energia acestei stări a nucleului de carbon trebuie să fie foarte apropiată de energia unui nucleu de beriliu-8 plus energia unui nucleu de heliu. Dacă energia acestei stări a nucleului de carbon ar fi prea mare sau prea mică, atunci

în stele nu s-ar forma decât foarte puțin carbon sau elemente mai grele, iar doar cu hidrogen și heliu nu ar fi posibilă apariția vieții. Energiile stărilor nucleare depind într-un mod complicat de toate constantele fizicii, cum ar fi masele și sarcinile electrice ale diferitelor tipuri de particule elementare. La prima vedere pare remarcabil că aceste constante au luat exact valorile necesare pentru a face posibilă formarea carbonului pe această cale.

Demonstrația că legile naturii au fost fin reglate pentru a face posibilă viața nu mi se pare prea convingătoare. Recent, un grup de fizicieni au arătat că energia acelei stări a carbonului ar putea fi considerabil mai mare, fără să se reducă semnificativ cantitatea de carbon produsă în stele. De asemenea, dacă schimbăm constantele naturii, putem găsi multe alte stări ale nucleului de carbon și ale altor nuclee care să ofere căi alternative pentru sinteza elementelor mai grele decât heliul. Nu putem estima cât de improbabil e pentru constantele naturii să ia valorile favorabile vieții inteligente.

Indiferent dacă principiul antropic este sau nu necesar pentru a explica lucruri precum energiile nucleare, există o situație în care el ține doar de bun-simț. Poate că diferitele universuri acceptabile logic există cu toate într-un anumit sens, fiecare cu propriul său set de legi fundamentale. Dacă așa stau lucrurile, atunci există cu siguranță multe universuri ale căror legi sau istorie le fac inospitaliere pentru viața inteligentă. Dar orice om de știință care se întreabă de ce lumea este așa cum este trebuie să trăiască într-unul dintre celelalte universuri, cele în care viața inteligentă *a putut apărea*.*

Punctul slab în această interpretare a principiului antropic este că semnificația unei multitudini de universuri nu e deloc limpede. O posibilitate foarte simplă propusă de Hoyle este ca de la o regiune la alta constantele naturii să varieze, astfel încât fiecare regiune a universului să fie un fel de subunivers. Același tip de interpretare a universurilor multiple ar fi posibilă dacă ceea ce în mod obișnuit

* Un fizician emigrat din Uniunea Sovietică mi-a spus că în urmă cu câțiva ani la Moscova circula un banc despre felul în care principiul antropic explică de ce viața e atât de mizerabilă. Există o probabilitate mai mare ca viața să fie mizerabilă decât ca ea să fie fericită; principiul antropic cere doar ca legile naturii să permită existența ființelor inteligente, nu și ca ele să fie fericite. (*N.a.*)

numim constante ale naturii ar fi diferite în epoci diferite din istoria universului. În ultimul timp s-a vorbit mult despre o eventualitate și mai spectaculoasă: universul nostru și celelalte universuri logic posibile, cu alte legi ultime, sunt cumva un efect secundar al unui mult mai vast megaunivers. De pildă, în încercările recente de a aplica mecanica cuantică la gravitație, s-a observat că, deși spațiul vid obișnuit pare liniștit și amorf, la fel ca suprafața oceanului văzută de la mare înălțime, dacă îl privim îndeaproape clocotește de fluctuații cuantice, așa încât se pot deschide „găuri de vierme” care leagă între ele părți ale universului aflate la mare distanță în spațiu și timp. În 1987 (urmând cercetările mai vechi ale lui Stephen Hawking, James Hartle și ale altora), Sidney Coleman de la Harvard a arătat că efectul deschiderii sau închiderii unei găuri de vierme e pur și simplu schimbarea diferitelor constante care apar în ecuațiile ce guvernează diferitele câmpuri. La fel ca în interpretarea lumilor multiple din mecanica cuantică, funcția de undă a universului se fragmentează într-un mare număr de termeni, iar în fiecare din ei „constantele” naturii iau valori diferite, cu probabilități diferite. În oricare dintre aceste teorii, e de bun-simț faptul că ne aflăm într-o regiune a spațiului, într-o epocă a istoriei cosmice sau într-un termen al funcției de undă în care „constantele” naturii se întâmplă să ia valori favorabile existenței vieții inteligente.

Fizicienii vor continua cu siguranță să încerce explicarea constantelor naturii fără a recurge la argumente antropice. Cred că vom descoperi că de fapt toate constantele naturii (poate cu o singură excepție) sunt stabilite printr-un un tip sau altul de principii de simetrie și că existența formelor de viață se va dovedi a nu necesita vreun reglaj fin ieșit din comun al legilor naturii. Acea singură constantă a naturii care ar trebui poate explicată printr-un fel de principiu antropic este *constanta cosmologică*.

Constanta cosmologică a apărut în prima încercare a lui Einstein de a aplica noua sa teorie generală a relativității la întregul univers. El a presupus, așa cum se obișnuia pe vremea aceea, că universul e static, dar curând și-a dat seama că ecuațiile câmpului gravitațional în forma lor inițială nu aveau nici o soluție statică dacă erau aplicate întregului univers. (De fapt, această concluzie nu e neapărat legată de relativitatea generală; în teoria newtoniană a gravitației

putem de asemenea găsi soluții în care galaxiile se apropie una de alta sub acțiunea forței gravitaționale dintre ele sau soluții în care galaxiile se îndepărtează una de alta ca urmare a unei explozii inițiale, dar nu ne putem aștepta ca în medie galaxiile să rămână aproximativ nemișcate în spațiu.) Pentru a face cu puțință un univers static, Einstein s-a hotărât să-și modifice teoria. El a introdus în ecuațiile sale un termen care ar produce ceva asemănător unei forțe de respingere la distanțe mari, putând astfel contrabalansa forța de atracție gravitațională. Acest termen e o constantă neprecizată, care în cosmologia statică a lui Einstein determina dimensiunea universului, și a fost numită constanta cosmologică.

Asta se întâmpla în 1917. Din cauza războiului Einstein nu știa că un astronom american, Vesto Slipher, găsise deja indicii că galaxiile (așa cum le numim acum) se îndepărtează, așa încât universul nu e static, ci în expansiune. Expansiunea a fost confirmată, iar rata ei a fost măsurată după război de Edwin Hubble, folosind noul telescop de 100 de țoli de la Mount Wilson. Einstein a regretat că își mutilase ecuațiile prin introducerea constantei cosmologice. Totuși, posibilitatea unei constante cosmologice nu a dispărut atât de ușor.

De fapt, nu există nici un motiv pentru a *nu* include o constantă cosmologică în ecuațiile de câmp ale lui Einstein. Teoria lui Einstein se bazase pe un principiu de simetrie care afirma că legile naturii nu trebuie să depindă de sistemul de referință din spațiu-timp pe care îl folosim pentru a studia aceste legi. Dar teoria sa inițială nu era cea mai generală teorie permisă de acel principiu de simetrie. Există un mare număr de termeni ce pot fi adăugați la ecuațiile de câmp, cu efecte neglijabile la distanțe astronomice, astfel încât ignorarea lor să nu aibă nici o consecință. În afară de aceștia, există un singur termen care poate fi adăugat la ecuațiile de câmp ale lui Einstein fără a viola principiul fundamental de simetrie al relativității generale și care să fie important în astronomie: este termenul implicând constanta cosmologică. În 1915, Einstein s-a bazat pe presupunerea că ecuațiile de câmp trebuie alese astfel încât să fie cât mai simple cu puțință. Experiența ultimelor trei sferturi de secol ne-a învățat că nu trebuie să ne încredem în asemenea presupuneri; am văzut în general că orice

complicație din teoriile noastre care nu e interzisă de o simetrie sau de un alt principiu fundamental intervine în realitate. Prin urmare, nu ajunge să spunem că o constantă cosmologică e o complicație inutilă. Simplitatea, ca orice alt lucru, trebuie explicată.

În mecanica cuantică problema e și mai dificilă. Diferitele câmpuri din universul nostru sunt supuse fluctuațiilor cuantice permanente care fac ca până și spațiul absolut vid să posede energie. Această energie e observabilă numai prin efectele sale gravitaționale; energia de orice fel generează câmpuri gravitaționale și, la rândul ei, este supusă acțiunii câmpurilor gravitaționale, așa încât o energie care umple întreg spațiul ar putea avea importante efecte asupra expansiunii universului. Nu putem calcula cu adevărat energia produsă pe unitatea de volum prin aceste fluctuații cuantice; folosind cele mai simple aproximații, rezultă că e infinită. Dar, presupunând că am găsi o cale de a elimina fluctuațiile de frecvență înaltă răspunzătoare de acest infinit, energia vidului pe unitatea de volum se dovedește a fi enormă: de aproximativ un bilion de bilioane de bilioane de bilioane de bilioane de bilioane de bilioane de bilioane de bilioane de ori mai mare decât cea permisă de rata observată a expansiunii universului. Aceasta pare să fie cea mai mare discrepanță privind ordinul de mărime a vreunei estimări din istoria științei.

Dacă această energie a spațiului vid e pozitivă, atunci ea produce o respingere gravitațională între particulele de materie la distanțe foarte mari, exact la fel ca termenul implicând constanta cosmologică adăugat de Einstein la ecuațiile sale de câmp în 1917. Putem deci privi energia datorată fluctuațiilor cuantice ca pe o simplă contribuție la o constantă cosmologică „totală”; expansiunea universului e afectată numai de această constantă cosmologică totală, nu de constanta cosmologică din ecuațiile de câmp ale relativității generale sau de energia cuantică a vidului, luate separat. Aceasta deschide posibilitatea ca problema constantei cosmologice și problema energiei spațiului vid să se anuleze reciproc. Cu alte cuvinte, ar putea exista o constantă cosmologică *negativă* în ecuațiile de câmp ale lui Einstein, care pur și simplu anulează efectul enormei energii a vidului datorată fluctuațiilor cuantice. Dar pentru a fi compatibilă cu ceea ce știm despre expansiunea

universului, constanta cosmologică totală trebuie să fie atât de mică încât acești doi termeni din constanta cosmologică totală să aibă primele 120 de zecimale egale. Un asemenea lucru se cere explicat.

Fizicienii teoreticieni încearcă de ani de zile să înțeleagă anularea constantei cosmologice totale, fără să fi găsit până acum vreo explicație convingătoare. Teoria corzilor complică și mai mult lucrurile. Diferitele versiuni ale ei dau fiecare o valoare diferită pentru constanta cosmologică totală (incluzând efectele fluctuațiilor cuantice ale vidului), dar în general aceasta e enormă. Cu o constantă cosmologică totală atât de mare, spațiul ar fi puternic curbat și nu ar semăna deloc cu familiarul spațiu tridimensional de geometrie euclidiană în care trăim.

Dacă toate acestea eșuează, am putea fi nevoiți să apelăm din nou la o explicație antropică. Ar putea exista mai multe „universuri” diferite, fiecare cu propria sa valoare pentru constanta cosmologică. Dacă acest lucru e adevărat, atunci singurul univers în care e de așteptat să ne aflăm este unul în care constanta cosmologică totală e suficient de mică pentru a permite apariția și evoluția vieții. Mai precis, dacă această constantă ar fi mare și negativă, universul și-ar parcurge ciclul de viață – dilatare și contractare – prea repede pentru ca viața să aibă timp să apară. Pe de altă parte, dacă ea ar avea o valoare mare și pozitivă, universul s-ar extinde la nesfârșit, dar forța de respingere produsă de constanta cosmologică ar împiedica condensarea gravitațională a pentru a forma galaxii și stele în universul timpuriu, și prin urmare viața nu ar avea unde să apară. Poate că adevărata teorie a corzilor (admițând că e una singură) este aceea care conduce la o constantă cosmologică totală în domeniul relativ îngust al valorilor mici pentru care viața poate apărea.

Una dintre consecințele fascinante ale acestui raționament este că nu există nici un motiv pentru care constanta cosmologică totală (incluzând efectele fluctuațiilor cuantice ale vidului) să fie riguros nulă; principiul antropic cere doar ca ea să fie suficient de mică pentru a permite galaxiilor să se formeze și să supraviețuiască miliarde de ani. De fapt, observații astronomice recente arată că valoarea constantei cosmologice totale nu este zero, ci e mică și pozitivă.

Unul dintre indicii e oferit de celebra problemă a „masei cosmologice lipsă”. Cea mai firească valoare pentru densitatea

masei universului (și valoarea cerută de teoriile cosmologice în vigoare) este valoarea limită pentru care atracția gravitațională permite universului să se extindă la nesfârșit. Dar această densitate e de cinci până la zece ori mai mare decât valoarea la care se ajunge dacă luăm în calcul masele roiurilor de galaxii (așa cum rezultă ele din studiul mișcării galaxiilor în roiuri). Masa lipsă ar putea fi reprezentată de un tip sau altul de materie întunecată, dar există și o altă posibilitate. După cum am mai spus, efectul unei constante cosmologice pozitive este exact același cu al unei densități de energie uniforme și constante, care conform faimoasei relații a lui Einstein dintre energie și masă este echivalentă cu o densitate de masă uniformă și constantă. E posibil deci ca acea densitate de „masă” lipsă (reprezentând 80-90% din densitatea estimată) să se explice printr-o constantă cosmologică totală pozitivă și nu printr-un tip oarecare de materie reală.

Asta nu înseamnă că nu există nici o diferență între o densitate de materie reală și o constantă cosmologică totală pozitivă. Universul se află în expansiune, deci oricare ar fi densitatea materiei reale în prezent, ea a fost mult mai mare în trecut. Dimpotrivă, constanta cosmologică totală nu se modifică în timp, prin urmare nici densitatea materiei cu care e echivalentă nu se modifică. Cu cât e mai mare densitatea materiei, cu atât e mai rapidă expansiunea universului, astfel încât rata de expansiune din trecut trebuie să fi fost mult mai mare dacă „masa” lipsă e materie obișnuită decât dacă e un efect al constantei cosmologice.

Alt indiciu și mai concludent în favoarea unei constante cosmologice totale pozitive provine dintr-o veche problemă legată de vârsta universului. În teoriile cosmologice convenționale putem deduce din rata observată a expansiunii universului că vârsta lui e între șapte și douăsprezece miliarde de ani. Dar vârstele roiurilor globulare de stele din cadrul galaxiei noastre sunt estimate la douăsprezece-cincisprezece miliarde de ani. Universul pare așadar mai tânăr decât roiurile globulare pe care le conține. Pentru a evita acest paradox ar trebui să alegem valoarea cea mai mică pentru vârsta roiurilor globulare și valoarea cea mai mare pentru vârsta universului. Pe de altă parte, după cum am văzut, introducerea unei constante cosmologice pozitive în locul materiei

întunecate ar avea ca efect scăderea ratei estimate de expansiune din trecut și prin urmare creșterea vârstei universului care ar fi dedusă din rata actuală de expansiune. De pildă, dacă densitatea „masei” cosmice s-ar datora în proporție de 90% constantei cosmologice, atunci, chiar și pentru cea mai mare rată estimată a expansiunii actuale a universului, vârsta acestuia ar fi de unsprezece miliarde de ani, în loc de numai șapte miliarde de ani, așa încât ar dispărea marea discrepanță cu vârsta roiurilor globulare.

O constantă cosmologică pozitivă care furnizează 80–90% din densitatea actuală a „masei” cosmice se încadrează bine în limitele care ar permite existența vieții. Știm că formarea cuasarilor, poate și a galaxiilor, începuse deja pe când universul era de șase ori mai mic decât în prezent fiindcă lungimea de undă a luminii provenind de la cuasari a crescut (s-a deplasat spre roșu) de șase ori. La acea vreme densitatea masei reale a universului era de șase la cub, adică de aproximativ două sute de ori, mai mare decât în prezent, prin urmare o constantă cosmologică ce corespunde unei densități de masă care e de numai cinci până la zece ori mai mare decât *actuala* densitate de masă ar fi putut să nu aibă nici un efect important asupra formării galaxiilor *la acea vreme*, dar ar fi împiedicat formarea mai recentă a galaxiilor. O constantă cosmologică ce furnizează o densitate a „masei” de cinci până la zece ori mai mare decât densitatea actuală a materiei cosmice este, în linii mari, compatibilă cu principiul antropic.

Din fericire, această problemă (spre deosebire de multe altele prezentate în acest capitol) ar putea fi lămurită în scurt timp prin observații astronomice. După cum am spus, rata de expansiune din trecut a universului trebuie să fi fost mult mai mare dacă masa lipsă s-ar datora materiei obișnuite, nu constantei cosmologice. Această diferență dintre ratele de expansiune afectează geometria universului și traiectoria razelor de lumină într-un fel care ar putea fi pus în evidență de astronomi. (De pildă, ar modifica numărul galaxiilor care sunt observate îndepărtându-se cu diferite viteze, precum și numărul lentilelor galactice gravitaționale – galaxii al căror câmp gravitațional curbează lumina unor obiecte mai îndepărtate suficient de mult pentru a se forma imagini multiple.) Deocamdată observațiile sunt neconcludente, dar aceste probleme

sunt intens studiate în diferite observatoare astronomice și în cele din urmă ar trebui confirmată sau infirmată o constantă cosmologică ce explică 80–90% din densitatea actuală a „masei” universului. O asemenea constantă cosmologică e mult mai mică decât ne-am aștepta conform estimărilor privind fluctuațiile cuantice, așa încât e greu să fie înțeleasă altfel decât pe baze antropice. Prin urmare, dacă o asemenea valoare pentru constanta cosmologică va fi confirmată de observații, va fi rezonabil să deducem că propria noastră existență joacă un rol important când explicăm de ce universul este așa cum este.

Sper totuși să nu fie cazul. Ca fizician teoretician, mi-ar plăcea să putem face predicții precise, nu afirmații vagi cum că anumite constante trebuie să se afle într-un interval care e mai mult sau mai puțin favorabil vieții. Sper că teoria corzilor va oferi într-adevăr o bază pentru teoria ultimă și că această teorie va avea destulă putere de predicție ca să poată prescrie valori pentru toate constantele din natură, inclusiv pentru constanta cosmologică. Rămâne de văzut.

CAPITOLUL X

La capătul drumului

În sfârșit Polul! Răspлата după trei secole. [...] Nu-mi vine să cred. Pare atât de simplu și de banal.

ROBERT PEARY, *Polul Nord*, jurnalul citat de autor

E greu să ne închipuim că am putea ajunge vreodată la principii fizice ultime care nu se explică prin principii mai profunde. În schimb, mulți cred că vom găsi un șir nesfârșit de principii din ce în ce mai profunde. De exemplu, Karl Popper, decanul filozofilor moderni ai științei, respinge „ideea unei explicații ultime”. El susține că „fiecare explicație poate fi explicată în continuare de o teorie sau o ipoteză cu un grad mai înalt de generalitate. Nu poate exista o explicație care să nu aibă nevoie de o explicație ulterioară[...]”

Popper, și mulți alții care cred într-un șir infinit de principii din ce în ce mai profunde, s-ar putea să aibă dreptate. Dar nu cred că această poziție poate fi susținută pe baza argumentului că nu s-a găsit încă o teorie ultimă. Ar fi ca și cum un explorator din secolul XIX ar spune că, din moment ce, oricât de mult au înaintat spre nord toate expedițiile arctice timp de sute de ani, la nord se afla mereu mare și gheață neexplorată, fie nu există Polul Nord, fie oricum nimeni nu va ajunge vreodată acolo. Unele căutări își ating ținta.

E larg răspândită impresia că oamenii de știință din trecut s-au amăgit deseori închipuindu-și că au găsit o teorie ultimă. Ei sunt comparați cu exploratorul Frederick Cook, care în 1908 a crezut doar că atinsese Polul Nord. Lumea își imaginează că oamenii de știință construiesc scheme teoretice complicate despre care spun că sunt teoria ultimă, iar apoi le apără cu înverșunare până când dovezi experimentale copleșitoare dezvăluie noilor generații de oameni de știință că schemele sunt complet greșite. Din câte știu însă, nici un fizician reputat din secolul XX nu a pretins că s-a

ajuns cu adevărat la o teorie ultimă. Fizicienii subestimează uneori distanța care îi separă de o teorie ultimă. Amintiți-vă predicția lui Michelson din 1902: „Nu e departe ziua când liniile convergente din multe domenii ale gândirii aparent îndepărtate se vor întâlni pe [...] un teren comun.“ Mai recent, la cursul inaugural după numirea sa la catedra lucasiană de matematică de la Cambridge (poziție ocupată în trecut de Newton și Dirac), Stephen Hawking a lăsat să se înțeleagă că teoriile „supergravitației extinse“, pe atunci la modă, urmau să ofere baza pentru un fel de teorie ultimă. Mă îndoiesc că Hawking ar spune și astăzi același lucru. Dar nici Michelson, nici Hawking nu au pretins vreodată că se ajunsese deja la o teorie finală.

Dacă istoria ne poate fi o călăuză, cred că ea sugerează că *există* o teorie ultimă. În secolul XX am văzut că săgețile explicative converg, la fel cum converg meridianele spre Polul Nord. Principiile noastre cele mai profunde, deși nu sunt încă finale, au devenit din ce în ce mai simple și mai economice. Am văzut împreună această convergență în explicarea proprietăților unei bucăți de cretă, iar eu am observat-o de-a lungul carierei mele de fizician. Pe când eram student, trebuia să învăț o mare cantitate de informații privind interacțiile slabe și tari ale particulelor elementare. Astăzi, studenții în fizica particulelor elementare învață modelul standard, foarte multă matematică și rareori altceva. (Profesorii de fizică sunt uneori exasperați că studenții cunosc prea puțin despre fenomenele din fizica particulelor elementare, dar presupun că și profesorii mei de la Cornell și Princeton erau exasperați că știam prea puțin despre spectroscopia atomică.) Este foarte greu de închipuit că teoriile devin tot mai profunde și mai simple fără ca săgețile explicative să converge spre ceva.

E posibil, dar puțin probabil, ca șirul de teorii tot mai simple nici să nu continue la nesfârșit, nici să nu ajungă la un capăt. Filozoful Michael Redhead de la Cambridge sugerează că ele ar putea reveni la ele însele. El observă că interpretarea ortodoxă a școlii de la Copenhaga a mecanicii cuantice impune existența unei lumi macroscopice de observatori și aparate de măsură, care la rândul ei se explică prin mecanica cuantică. Cred că acesta e încă un exemplu privind neajunsurile interpretării școlii de la Copenhaga

și ale diferenței între felul în care tratează ea fenomenele cuantice și observatorii care le studiază. În abordarea realistă a mecanicii cuantice a lui Hugh Everett și a altora, există o singură funcție de undă ce descrie toate fenomenele, inclusiv experimentele și observatorii, iar legile fundamentale sunt cele care descriu evoluția acestei funcții de undă.

Încă și mai radicală este ideea că la capătul drumului vom descoperi că nu există nici o lege. Profesorul și prietenul meu John Wheeler spunea uneori că nu există nici o lege fundamentală și că toate legile pe care le studiem azi sunt impuse naturii de modul în care facem noi observațiile. Urmând o cale oarecum diferită, teoreticianul de la Copenhaga Holger Nielsen a propus o „dinamică aleatoare” conform căreia, indiferent ce am presupune despre natură la distanțe foarte mici sau energii foarte înalte, fenomenele accesibile în laboratoarele noastre vor arăta aproximativ la fel.

Cred că atât Wheeler, cât și Nielsen maschează pur și simplu problema legilor finale. Lumea fără legi a lui Wheeler are totuși nevoie de metalegi care să ne spună cum impun observațiile noastre regularități asupra naturii, între aceste metalegi aflându-se însăși mecanica cuantică. Nielsen, la rândul lui, are nevoie de o metalege pentru a explica cum se schimbă felul în care ne apare natura atunci când schimbăm scara distanțelor și energiilor la care efectuăm măsurătorile, iar pentru aceasta presupune validitatea a ceea ce numim ecuațiile grupului de renormare, a căror origine într-o lume lipsită de legi e fără îndoială problematică. Cred că toate încercările de a renunța la legile fundamentale ale naturii, presupunând că ar avea vreun succes, conduc pur și simplu la introducerea unor metalegi care să ne spună cum au apărut acele lucruri pe care *acum* le numim legi.

Există și o altă posibilitate care mi se pare mai probabilă și mult mai tulburătoare. Poate că există o teorie finală, un set simplu de principii din care decurg toate săgețile explicative, dar nu o vom cunoaște niciodată. De exemplu, s-ar putea ca oamenii pur și simplu să nu fie suficient de inteligenți pentru a descoperi sau a înțelege teoria ultimă. Poți antrena câinii să facă tot felul de lucruri istețe, dar mă îndoiesc că va reuși cineva să antreneze un câine pentru a folosi mecanica cuantică la calculul nivelelor de energie

atomică. Cel mai întemeiat motiv de speranță că specia noastră e în stare să progreseze intelectual și în viitor e minunata capacitate de a stabili prin limbaj o comunicare între creierele noastre, dar s-ar putea ca acest lucru să nu fie suficient. Eugene Wigner ne-a prevenit că „nu avem de ce să ne așteptăm ca mintea noastră să poată formula concepte desăvârșite pentru înțelegerea deplină a fenomenelor naturii neînsuflețite“. Până acum, din fericire, se pare că nu am ajuns la capătul resurselor noastre intelectuale. În fizică cel puțin, fiecare nouă generație de absolvenți pare mai inteligentă decât precedentă.

Un motiv de îngrijorare mult mai presant este acela că efortul de a descoperi legile finale ar putea fi oprit din lipsa fondurilor. Această problemă s-a întrezărit în recenta dezbatere din Statele Unite privind soarta superacceleratorului. Costul său de opt miliarde de dolari, defalcat pe o perioadă de un deceniu, nu e un efort prea mare pentru posibilitățile țării noastre, dar chiar și fizicienii energiilor înalte ar ezita să propună apoi un accelerator mult mai scump.

În afara întrebărilor privind modelul standard la care ne așteptăm ca superacceleratorul să dea un răspuns, există întrebări mai profunde legate de unificarea interacțiilor tare, electroslabă și gravitațională, întrebări la care nici un accelerator imaginabil în prezent nu ar putea răspunde direct. Energia Planck, cea cu adevărat fundamentală, energia la care toate aceste probleme ar putea fi studiate experimental, este de aproximativ o sută de bilioane de ori mai mare decât energia la care ar putea ajunge superacceleratorul. La această energie Planck ne așteptăm ca toate forțele naturii să fie unificate. De asemenea, conform teoriilor moderne ale corzilor, aceasta este aproximativ energia necesară pentru a excita primele moduri de vibrație ale corzilor, dincolo de modurile cele mai joase pe care le observăm la cuarcii și fotonii obișnuiți, precum și celelalte particule obișnuite din modelul standard. Din păcate, asemenea energii par imposibil de atins. Chiar dacă toate resursele economice ale omenirii ar fi alocate în acest scop, deocamdată nu am ști să construim o mașină care să accelereze particulele la asemenea energii. Nu e vorba că energia în sine n-ar fi disponibilă – energia Planck este aproximativ aceeași cu energia chimică dintr-un rezervor de automobil. Greu e să

concentrezi toată această energie într-un singur proton sau electron. Poate că în viitor vom învăța să construim asemenea acceleratoare pe căi complet diferite de cele folosite azi, eventual prin utilizarea gazelor ionizate pentru a facilita transferul de energie de la fascicule laser puternice la particule individuale încărcate electric, dar chiar și în acest caz probabilitatea de reacție a particulelor la această energie ar putea fi atât de mică încât experimentul să se dovedească imposibil. E mai probabil ca prin progresele teoriei și prin conceperea altor tipuri de experimente să evităm într-o bună zi necesitatea de a construi acceleratoare de energii tot mai mari.

Eu unul cred că există o teorie finală și că o putem descoperi. Poate că experimentele efectuate cu superacceleratorul vor oferi noi informații lămuritoare, iar pe baza lor teoreticienii vor reuși să formuleze teoria ultimă fără a fi nevoiți să studieze particulele la energia Planck. Am putea chiar găsi un candidat pentru teoria finală printre actualele teorii ale corzilor.

Ce ciudat ar fi să asistăm la descoperirea teoriei finale! Descoperirea legilor ultime ale naturii va marca o ruptură în istoria intelectuală a omenirii, cea mai spectaculoasă de la începuturile științei moderne în secolul al XVII-lea. Ne-o putem oare închipui?

Deși nu e greu de conceput o teorie finală care să nu se explice prin alte principii mai profunde, e foarte greu de imaginat o teorie finală care să nu aibă *nevoie* de o asemenea explicație. Oricare ar fi teoria finală, cu siguranță ea nu va fi *logic* inevitabilă. Chiar dacă se va dovedi că teoria finală e o teorie a corzilor ce poate fi exprimată prin câteva ecuații simple, și chiar dacă vom demonstra că aceasta e singura teorie cuantică ce poate descrie gravitația împreună cu celelalte forțe fără contradicții matematice, ne vom întreba totuși de ce trebuie să existe gravitația și de ce natura trebuie să se supună regulilor mecanicii cuantice. De ce nu e universul alcătuit doar din particule punctiforme mișcându-se la nesfârșit după regulile mecanicii newtoniene? De ce există ceva, la urma urmei? Probabil că cei mai mulți sunt de aceeași părere cu Redhead, care neagă faptul că „obiectivul de a așeza știința pe baze apriorice care se justifică prin ele însele este unul credibil“.

Pe de altă parte, Wheeler remarca odată că, atunci când vom ajunge la legile ultime ale naturii, ne vom mira că ele nu erau

evidente de la bun început. Am impresia că Wheeler ar putea avea dreptate, dar numai fiindcă până atunci vom fi pregătiți de secole de eșecuri și succese științifice să considerăm aceste legi evidente. Dar chiar și atunci, într-o formă oricât de atenuată, cred că străvechea întrebare „de ce?” nu va dispărea. Filozoful Robert Nozick de la Harvard și-a pus această problemă și sugerează că, în loc să încercăm să deducem teoria finală pe baza logicii pure, ar trebui să căutăm argumente care să facă din ea mai mult decât un simplu fapt.

În ce mă privește, cred că în privința asta tot ce putem spera este să demonstrăm că teoria finală, deși nu e logic inevitabilă, e *izolată* logic. Cu alte cuvinte, s-ar putea dovedi că, deși vom putea mereu închipui alte teorii complet diferite de adevărata teorie finală (de pildă, plictisitoarea lume a particulelor guvernate de mecanica newtoniană), teoria finală va fi atât de rigidă încât va fi imposibil s-o modifici puțin fără ca ea să conducă la absurdități logice. Într-o teorie izolată logic fiecare constantă a naturii poate fi calculată din principiile fundamentale; o ușoară modificare a valorii oricărei constante ar distruge coerența teoriei. Teoria finală ar putea semăna cu un porțelan fin pe care nu-l poți deforma fără să-l spargi. În acest caz, deși tot nu am ști de ce teoria finală e corectă, am ști pe baza matematicii și logicii pure de ce adevărul nu e ușor diferit.

Aceasta nu e o simplă posibilitate – am înaintat deja destul de mult spre o asemenea teorie izolată logic. Cele mai profunde principii fizice pe care le cunoaștem sunt regulile mecanicii cuantice, care stau la baza a tot ce cunoaștem despre materie și interacțiile ei. Mecanica cuantică nu e inevitabilă logic; nimic nu pare logic imposibil la predecesoarea ei, mecanica newtoniană. Și totuși fizicienii n-au găsit nici o cale de a modifica *puțin* regulile mecanicii cuantice fără să producă dezastre logice, cum ar fi probabilități negative.

Dar mecanica cuantică în sine nu e o teorie fizică completă. Ea nu ne spune nimic despre particulele și forțele ce pot exista. Luați orice manual de mecanică cuantică și veți găsi o stranie diversitate de exemple ilustrative de particule și forțe ipotetice, iar majoritatea loc nu seamănă cu nimic din lumea reală, însă toate sunt perfect compatibile cu principiile mecanicii cuantice și pot fi folosite pentru a-i învăța pe studenți să aplice aceste principii.

Varietatea teoriilor posibile scade mult dacă luăm în considerare numai teoriile cuantice compatibile cu relativitatea specială. Majoritatea acestor teorii pot fi eliminate logic deoarece conduc la nonsensuri, cum ar fi energii sau rate de reacție infinite. Chiar și așa există încă o mulțime de teorii logic posibile, cum ar fi teoria forțelor nucleare tari numită cromodinamica cuantică, pentru care universul e format doar din cuarci și gluoni. Dar majoritatea acestor teorii sunt eliminate dacă introducem și gravitația. Poate că vom reuși să demonstrăm matematic că impunerea acestor cerințe face să rămânem doar cu o singură teorie cuantică logic posibilă, eventual o unică teorie a corzilor. Dacă așa stau lucrurile, deși vor exista multe alte teorii finale logic posibile, doar una va descrie ceva care seamănă cât de cât cu lumea noastră reală.

Dar de ce ar trebui ca teoria finală să descrie ceva care să semene cu lumea noastră? Explicația ar putea fi găsită în ceea ce Nozick numește *principiul fecundității*. El afirmă că diferitele universuri logic acceptabile există toate într-un anume sens, fiecare cu propriul lui set de legi fundamentale. Principiul fecundității nu se explică prin nimic, dar cel puțin e coerent cu sine; după cum spune Nozick, principiul fecundității afirmă „că toate posibilitățile se realizează, iar el însuși e una din aceste posibilități“.

Dacă acest principiu e adevărat, atunci lumea noastră cuantică există, dar la fel de bine există și lumea newtoniană a particulelor rotindu-se la nesfârșit sau lumi care nu conțin absolut nimic, precum și nenumărate alte lumi pe care nu ni le putem nici măcar imagina. Nu e vorba doar de faptul că așa-numitele constante ale naturii ar diferi de la o regiune la alta a universului, de la o epocă la alta sau de la un termen al funcției de undă la altul. După cum am văzut, toate acestea sunt posibilități ce s-ar putea înfăptui pe baza unei teorii cu adevărat fundamentale cum e cosmologia cuantică, dar asta nu ne ajută să înțelegem de ce acea teorie fundamentală este așa cum este. În schimb, principiul fecundității presupune că există universuri complet diferite, supuse unor legi complet diferite. Dar, dacă aceste alte universuri sunt total inaccesibile și incognoscibile, atunci afirmația că ele există pare să nu aibă nici o consecință, cu excepția faptului că evită întrebarea de ce ele nu există. S-ar părea că încercăm să fim logici într-o problemă care

nu poate fi atacată cu argumente logice: ce e cazul și ce nu e cazul să ne trezească mirarea.

Principiul fecundității poate oferi un alt mod de a justifica folosirea raționamentului antropic pentru a explica faptul că legile finale ale universului *nostru* sunt așa cum sunt. Pot exista în principiu multe tipuri de universuri ale căror legi sau istorie le fac inospitaliere pentru viața inteligentă, dar orice om de știință care se întreabă de ce lumea este așa cum este trebuie să trăiască în unul dintre celelalte universuri, în care viața inteligentă *a putut* apărea. Astfel putem elimina imediat universul guvernat de fizica newtoniană (de pildă fiindcă nu pot exista atomi stabili într-o asemenea lume) sau universul care nu conține nimic.

La limită, e posibil să existe o singură teorie izolată logic, fără *nici o* constantă nedeterminată, care să fie compatibilă cu existența ființelor inteligente capabile să-și pună întrebări despre teoria finală. Dacă acest lucru ar putea fi demonstrat, atunci am fi cel mai aproape cu putință de un răspuns satisfăcător la întrebarea de ce e lumea așa cum e.

Care ar fi efectul descoperirii unei asemenea teorii finale? Desigur, răspunsul complet va veni abia când vom cunoaște teoria finală. Am putea descoperi lucruri legate de felul în care e guvernată lumea la fel de surprinzătoare pentru noi cum ar fi fost legile mecanicii newtoniene pentru Thales. E cert însă că descoperirea unei teorii finale nu va pune capăt aventurii științifice. Chiar lăsând la o parte problemele care trebuie studiate în scopuri tehnologice sau medicale, vor exista încă o mulțime de probleme ale științei pure care vor fi cercetate pentru că oamenii de știință se așteaptă ca ele să aibă soluții frumoase. În momentul de față, numai în fizică există probleme precum turbulența sau supraconductibilitatea la temperaturi înalte care e de așteptat să aibă explicații profunde și frumoase. Nimeni nu știe cum s-au format galaxiile, cum s-a declanșat mecanismul genetic sau cum sunt stocate amintirile în creier. Nici una dintre aceste probleme nu va fi probabil afectată de descoperirea unei teorii finale.

Pe de altă parte, descoperirea unei teorii finale ar putea avea implicații ce depășesc cu mult granițele științei. Mințile multor oameni din zilele noastre sunt bântuite de tot felul de concepții

false și iraționale, de la superstiții relativ inofensive cum e astrologia până la cele mai nocive ideologii. Faptul că legile fundamentale ale naturii rămân necunoscute îi îndeamnă pe oameni să spere că într-o bună zi acele lucruri iraționale la care țin își vor găsi un loc respectabil în structura științei. Am fi naivi dacă ne-am aștepta ca orice descoperire din știință să poată prin ea însăși elibera omenirea de toate concepțiile greșite, dar descoperirea legilor ultime ale naturii va lăsa totuși ceva mai puțin loc în imaginație pentru credințe iraționale.

Odată descoperită teoria finală, s-ar putea să regretăm că natura a devenit mai banală, mai săracă în miracole și mistere. Ceva asemănător s-a întâmplat deja. De-a lungul celei mai mari părți a istoriei, pe hărțile noastre apăreau mari spații necunoscute, iar imaginația le putea umple cu dragoni, orașe de aur și antropofagi. Principala aventură a cunoașterii erau explorările geografice. Când Ulise al lui Tennyson „a urmat cunoașterea ca pe o stea ce se scufundă, dincolo de granițele ultime ale gândului“, el a navigat în Atlanticul necunoscut, „dincolo de apus și de apele ce scaldă toate stelele din vest“. Dar astăzi fiecare pogon de pământ a fost cartografiat, iar dragonii au dispărut cu toții. Odată cu descoperirea legilor finale, reveriile noastre se vor contracta din nou. Vor exista la nesfârșit probleme științifice și un întreg univers de explorat, dar cred că oamenii de știință din viitor s-ar putea să-i invidieze puțin pe fizicienii zilelor noastre, căci noi încă mai căutăm legile ultime.

CAPITOLUL XI

Și Dumnezeu?

„Știi“, spuse Port, iar vocea lui suna ireal, așa cum se aud vocile după o pauză lungă într-un loc pustiu, „aici cerul e foarte ciudat. Când mă uit la el am de multe ori impresia că acolo sus se află ceva solid care ne ocrotește de ce e dincolo.“

Kit tremură ușor atunci când zise: „De ce e dincolo?“

„Da.“

„Dar ce e dincolo?“ Vocea ei abia se auzea.

„Bănuiesc că nimic. Doar întuneric. Beznă absolută.“

PAUL BOWLES, *Cerul ocrotitor*

„Cerurile povestesc slava lui Dumnezeu și firmamentul des-tăinuiește lucrul mâinilor sale.“ Pentru regele David, sau pentru cine a scris acest psalm, stelele trebuie să fi fost dovada vizibilă a unei existențe desăvârșite, atât de diferită de cenușia noastră lume pământească de stânci, pietre și copaci. Între timp, Soarele și celelalte stele și-au pierdut statutul privilegiat; știm acum că sunt sfere de gaz strălucitor, ținute laolaltă de gravitație și împiedicate să colapseze de presiunea menținută prin căldura produsă de reac-țiile termonucleare din miezul stelelor. Stelele nu ne spun nimic mai mult și nimic mai puțin despre slava lui Dumnezeu decât pietrele din jurul nostru.

Dacă am putea descoperi în natură un semn al lucrării lui Dum-nezeu, acela ar fi legile ultime ale naturii. Cunoșcând aceste legi am intra în posesia cărții în care sunt scrise regulile ce guvernează stelele, pietrele și tot restul. E firesc deci ca Stephen Hawking să numească legile naturii „mintea lui Dumnezeu“. Un alt fizician, Charles Misner, a folosit un limbaj asemănător pentru a compara perspectiva fizicii cu cea a chimiei: „Dacă specialistul în chimie organică e întrebat «De ce sunt 92 de elemente și când au fost ele

produse?», el poate spune «Cel din biroul de alături știe asta». Dar dacă fizicianul e întrebat «De ce e universul construit așa încât să asculte de anumite legi fizice și nu de altele?», el poate foarte bine să răspundă «Dumnezeu știe». “Einstein i-a spus odată asistentului său Ernst Straus: „Ce mă interesează cu adevărat este dacă Dumnezeu a avut de ales atunci când a creat lumea.“ Cu alt prilej, el a spus că rostul fizicii „nu e numai acela de a ști cum este natura și cum funcționează ea, ci și de a atinge pe cât posibil scopul utopic și aparent arogant de a ști de ce *natura este așa și nu altfel*. [...] E ca și cum ai simți că Dumnezeu Însuși nu putea aranja aceste relații într-un alt mod decât cel care există în realitate. [...] Acesta e elementul prometeic al experienței științifice. [...] Aici am găsit mereu cea magie aparte a efortului științific.“ Religia lui Einstein era atât de vagă încât bănuiesc că afirmațiile lui au un sens metaforic, după cum ne lasă să înțelegem prin acel „ca și cum“. Fără îndoială că metafora li se pare firească fizicienilor pentru că domeniul lor e unul fundamental. Teologul Paul Tillich a observat cândva că între oamenii de știință numai fizicienii par să poată folosi fără stânjenală cuvântul „Dumnezeu“. Orice fel de religie (sau de absență a ei) am împărtăși, a vorbi despre legile ultime ale naturii ca despre mintea lui Dumnezeu e o metaforă irezistibilă.

Am întâlnit această asociere într-un loc neobișnuit, la Washington, în Camera Deputaților. Când am depus mărturie în favoarea proiectului Superacceleratorului Supraconductor (SSC) în fața Comitetului pentru Știință, Spațiu și Tehnologie, am arătat că în cercetările noastre asupra particulelor elementare descoperim legi care devin din ce în ce mai coerente și mai generale și începem să bănuim că nu e un simplu accident, ci există în aceste legi o frumusețe care reflectă ceva întipărit în structura universului la un nivel foarte adânc. După ce am făcut aceste observații, au luat cuvântul și alții, apoi membrii comitetului au pus întrebări. A urmat un dialog între doi membri ai comitetului, deputatul Harris W. Fawell, republican din Illinois, care în general s-a arătat favorabil proiectului SSC, și deputatul Don Ritter, republican din Pennsylvania, un fost inginer metalurg care se numără printre cei mai înverșunați adversari ai proiectului din Congres:

DL FAWELL: Vă mulțumesc foarte mult. Găsesc remarcabile toate depozițiile dumneavoastră. Cred că a fost excelent. Dacă ar trebui vreodată să explic cuiva motivele pentru care e nevoie de SSC, sunt sigur că aş face apel la declarațiile dumneavoastră. Ar fi de mare ajutor. Aş vrea uneori să găsesc un singur cuvânt care să poată spune totul, dar asta e imposibil. Poate că dumneavoastră, domnule Weinberg, v-ați apropiat de asta, nu sunt sigur, dar mi-am notat. Ați spus că bănuiați că nu e un accident faptul că există reguli care guvernează materia, iar eu am consemnat că îl vom găsi în felul acesta pe Dumnezeu. Bineînțeles, nu ați făcut această afirmație, ci ați spus că ne va ajuta cu siguranță să înțelegem mult mai multe lucruri despre univers.

DL RITTER: Poate domnul deputat să facă această concesie? Dacă domnul deputat face această concesie, atunci eu...

DL FAWELL: Nu cred că vreau s-o fac.

DL RITTER: Dacă acest aparat servește la așa ceva, atunci mă voi alătura și eu și îl voi susține.

Am avut suficientă minte să nu mă bag în discuție, fiindcă nu-mi închipuiam că acei deputați doreau să știe ce gândeam eu despre ideea de a-l găsi pe Dumnezeu în SSC, iar dacă le-aș fi spus ce cred despre asta n-ar fi fost bine pentru proiect.

Unii oameni au o perspectivă atât de largă și de flexibilă asupra lui Dumnezeu încât e inevitabil să-l găsească oriunde îl caută. Se spune că „Dumnezeu e absolutul“, „Dumnezeu e firea noastră mai bună“ sau „Dumnezeu e universul“. Evident, ca orice alt cuvânt, „Dumnezeu“ poate căpăta orice înțeles dorim. Dacă vrei să spui că „Dumnezeu e energie“, atunci îl poți găsi pe Dumnezeu într-o bucată de cărbune. Dar dacă dăm cât de cât greutate cuvintelor, s-ar cuveni să respectăm felul în care au fost folosite în istorie și mai ales să păstrăm distincțiile care împiedică confuzia sensurilor.

Prin urmare, cred că, pentru a avea rost folosirea cuvântului „Dumnezeu“, el ar trebui să desemneze un Dumnezeu implicat activ, un creator și un legiuitor care a stabilit nu numai legile naturii și ale universului, ci și criteriile pentru bine și rău, o persoană preocupată de acțiunile noastre, pe scurt ceva la care are sens să

ne închinăm.* Acesta e Dumnezeu care a contat în cursul istoriei pentru bărbați și femei. Savanții și alți oameni folosesc uneori cuvântul „Dumnezeu“ pentru a desemna ceva atât de abstract și de neimplicat, încât e greu să facem distincția între El și legile naturii. Einstein spunea odată că el crede în „Dumnezeul lui Spinoza, care se dezvăluie pe Sine în armonia ordinii a tot ce există, nu într-un Dumnezeu care se ocupă cu destinele și acțiunile oamenilor“. Dar ce importanță are dacă folosim cuvântul „Dumnezeu“ în loc de „ordine“ sau „armonie“, cu excepția faptului că astfel scăpăm poate de acuzația că nu avem nici un Dumnezeu? Bineînțeles, oricine e liber să dea cuvântului „Dumnezeu“ acest sens, dar cred că în felul ăsta ideea de Dumnezeu devine nu neapărat falsă, ci insignifiantă.

Vom găsi oare în legile ultime ale naturii un Dumnezeu implicat activ? Pare aproape absurd să-ți pui această întrebare, nu numai fiindcă nu cunoaștem încă legile ultime, ci mai cu seamă fiindcă e greu să-ți imaginezi că ai ajunge în posesia unor principii ultime care nu mai au nevoie să fie explicate cu ajutorul unor principii mai profunde. Însă, chiar dacă e prematur să ne gândim la asta, e aproape imposibil să nu-ți pui problema dacă în teoria finală vom găsi răspunsul la cele mai profunde întrebări, vreun semn al lucrării unui Dumnezeu implicat activ. Nu cred că acest lucru se va întâmpla.

Întreaga noastră experiență de-a lungul istoriei științei s-a îndreptat în direcția opusă, spre o impersonalitate glacială a legilor naturii. Primul mare pas pe această cale a fost demitizarea cerului. Cunoaștem cu toții personajele-cheie: Copernic, care a lansat ideea că Pământul nu se află în centrul universului, Galilei, care a făcut ca spusele lui Copernic să devină plauzibile, Bruno, care a intuit că Soarele e doar una din nenumăratele stele, și Newton, care a demonstrat că aceleași legi ale mișcării și gravitației se aplică atât sistemului solar, cât și corpurilor de pe Pământ. Cred că

* Ar trebui să fie limpede că discutând despre aceste lucruri vorbesc doar în nume propriu și că în acest capitol las deoparte orice pretenții de specialist. (N.a.)

momentul-cheie a fost observația lui Newton că aceeași lege a gravitației determină atât mișcarea Lunii în jurul Pământului, cât și căderea unui corp pe suprafața Pământului. În secolul XX demitizarea cerului a făcut un pas înainte prin astronomul american Edwin Hubble. Măsurând distanța până la Nebuloasa Andromeda, Hubble a arătat că aceasta și, în consecință, mii de alte nebuloase asemănătoare nu erau părți ale galaxiei noastre aflate la mare distanță, ci galaxii de sine stătătoare, la fel de vaste ca a noastră. Cosmologii moderni vorbesc chiar despre un principiu copernican: regula că nici o teorie cosmologică nu poate fi luată în serios dacă plasează propria noastră galaxie într-un loc privilegiat din univers.

Viața, la rândul ei, a fost demitizată. Justus von Liebig și alți chimiști de la începutul secolului XIX au demonstrat că nu exista nici o piedică pentru sinteza în laborator a substanțelor asociate vieții cum e acidul uric. Mai presus de toate acestea, Charles Darwin și Alfred Russel Wallace au arătat că minunatele însușiri ale corpurilor vii au putut evolua prin selecție naturală, fără vreun plan sau vreo îndrumare din exterior. Procesul de demitizare a fost accelerat în acest secol prin succesele continue ale biochimiei și biologiei moleculare în explicarea funcționării corpurilor vii.

Demitizarea vieții a avut un efect mult mai mare asupra sentimentelor religioase decât orice descoperire din fizică. Nu trebuie să ne mire faptul că reducționismul din biologie și teoria evoluției sunt cele care continuă să întâmpine cea mai înverșunată opoziție, nu descoperirile din fizică și astronomie.

Chiar și la unii oameni de știință s-au putut întâlni uneori opinii ce țin de vitalism, credința că există procese biologice care nu pot fi explicate făcând apel la fizică și chimie. În secolul XX biologii (inclusiv antireducționiști precum Ernst Mayr) s-au ferit în general de vitalism, dar în 1944 Erwin Schrödinger a afirmat în cunoscuta sa carte *Ce este viața?* că „se cunosc destule lucruri despre structura materială a vieții pentru a spune de ce fizica din zilele noastre nu poate explica viața“. Motivul invocat de el era că informația genetică ce guvernează organisme vii e mult prea stabilă pentru a se putea pune în acord cu lumea permanentelor fluctuații din mecanica cuantică și mecanica statistică. Eroarea lui Schrödinger a fost sesizată de Max Perutz, biochimistul care, între altele, a

descoperit structura hemoglobinei: Schrödinger a ignorat stabilitatea care poate fi obținută prin procesul chimic numit cataliză enzimatică.

Cel mai respectabil critic din domeniul universitar al evoluției în momentul de față ar putea fi profesorul Phillip Johnson de la Universitatea din California. Johnson recunoaște că evoluția a avut loc și că uneori se datorează selecției naturale, dar afirmă că nu există nici o „dovadă experimentală incontestabilă” a faptului că evoluția nu e rezultatul unui plan divin. Evident, nu putem spera să demonstrăm vreodată că nu există nici un agent supranatural care să încline balanța în favoarea unor mutații și în defavoarea altora. Dar același lucru se poate spune despre orice altă teorie științifică. Nu există nimic în aplicarea cu succes a legilor lui Newton sau ale lui Einstein la sistemul solar care să ne împiedice să presupunem că vreo cometă capătă din când în când un mic ghiont din partea unui agent divin. E limpede că Johnson pune această problemă nu fiindcă ar fi imparțial și lipsit de prejudecăți, ci fiindcă, din motive religioase, manifestă față de viață o grijă pe care nu o are și față de comete. Dar singura soluție pentru ca orice fel de știință să poată progresa e să presupunem că nu există nici o intervenție divină și să vedem cât de departe putem ajunge pornind de la această ipoteză.

Johnson susține că evoluția naturală, „evoluția care nu implică nici o intervenție sau dirijare din partea unui creator din afara lumii naturale”, nu oferă o explicație prea bună pentru originea speciilor. Cred că aici se înșală fiindcă nu-și dă seama câte dificultăți întâmpină mereu orice teorie științifică pentru a explica ceea ce observăm. Lăsând la o parte erorile grosolane, calculele și observațiile noastre se bazează întotdeauna pe presupuneri care merg dincolo de validitatea teoriei pe care încercăm s-o testăm. Nu a existat nici un moment în care calculele bazate pe teoria newtoniană a gravitației, sau pe orice altă teorie, să fie într-un acord perfect cu toate observațiile. În lucrările paleontologilor și biologilor evoluționiști recunoaștem o situație cunoscută din fizică; folosind teoria evoluției, biologii operează cu o teorie de mare succes, dar care mai are încă multe de explicat. Cred că e o descoperire cu adevărat importantă faptul că putem ajunge foarte

departe în explicarea lumii fără a face apel la intervenția divină, atât în biologie, cât și în fizică.

Johnson are însă dreptate în altă privință. El spune că există o incompatibilitate între teoria evoluției naturale și religie, așa cum e ea în general înțeleasă, și îi ia la rost pe oamenii de știință și pe profesorii care neagă acest lucru. El se plânge că „evoluția naturală este compatibilă cu existența lui «Dumnezeu» doar dacă prin acest termen înțelegem o simplă cauză primă care nu mai intervine după stabilirea legilor naturii și punerea în funcțiune a mecanismului natural”.

Incompatibilitatea dintre teoria modernă a evoluției și credința într-un Dumnezeu implicat activ nu mi se pare a fi una de ordin logic – ne putem închipui că Dumnezeu a stabilit legile naturii și a pus în funcțiune mecanismul evoluției cu intenția ca prin selecție naturală tu și cu mine să apărem cândva –, dar există o incompatibilitate de ordin lăuntric. La urma urmei, religia nu a apărut în mințile celor care vorbeau despre cauze prime atotcunoscătoare, ci în inimile celor care tânjeau după intervenția permanentă a unui Dumnezeu implicat activ.

Spre deosebire de mulți dintre liberali, conservatorii religioși înțeleg cât de importantă e miza disputei privind predarea evoluției în școlile publice. În 1983, la scurt timp după ce venisem în Texas, am fost invitat să depun mărturie în fața unui comitet al senatului din Texas în legătură cu o lege care interzicea predarea teoriei evoluției în manualele liceelor de stat dacă nu se acorda o atenție egală creaționismului. Unul dintre membrii comitetului m-a întrebat cum ar putea statul susține predarea unei teorii științifice atât de dăunătoare credinței religioase. I-am răspuns că, dacă e nedrept ca de dragul ateilor să dăm evoluției mai multă importanță în predarea biologiei decât i se cuvine, e de asemenea incompatibil cu Primul Amendament să acordăm evoluției mai puțină importanță doar pentru a proteja credințele religioase. Implicațiile religioase ale teoriilor științifice nu privesc învățământul public. Răspunsul meu nu l-a mulțumit pe senator fiindcă știa la fel de bine ca mine ce efecte ar avea un curs de biologie care pune accentul convenit pe teoria evoluției. În timp ce părăseam sala l-am auzit bombănind: „Există totuși un Dumnezeu în cer.” Așa o fi, însă noi

am câștigat bătălia; acum manualele liceelor din Texas nu numai că au dreptul, dar sunt și obligate să prezinte teoria modernă a evoluției, fără nici un fel de aberații despre creaționism. Există însă multe locuri (în special în țările islamice) unde această bătălie încă nu a fost câștigată, și nicăieri nu avem garanția că ea va rămâne câștigată.

Se spune de multe ori că nu există nici un conflict între știință și religie. De pildă, într-o recenzie la cartea lui Johnson, Stephen Gould afirmă că știința și religia nu intră în conflict, pentru că „știința se ocupă de realitatea faptelor, iar religia de comportamentul oamenilor”. În multe privințe sunt de acord cu Gould, dar aici cred că merge prea departe; înțelesul religiei e definit prin ceea ce cred oamenii religioși, iar cei mai mulți dintre ei ar fi surprinși să afle că religia n-are nici o legătură cu realitatea obiectivă.

Opinia lui Gould e astăzi larg răspândită printre oamenii de știință și credincioșii cu vederi liberale. Aceasta mi se pare o importantă retragere a religiei de pe pozițiile ocupate odinioară. Cândva natura părea inexplicabilă fără o nimfă în fiecare pârâu și o driadă în fiecare copac. Chiar și în secolul XIX structura plantelor și animalelor era privită ca o dovadă evidentă a existenței unui creator. Rămân încă nenumărate lucruri din natură pe care nu le putem explica, dar credem că cunoaștem principiile care le guvernează. Astăzi adevăratele mistere trebuie căutate în cosmologie și în fizica particulelor elementare. Pentru cei care nu văd nici un conflict între știință și religie, retragerea religiei de pe teritoriul ocupat acum de știință este aproape completă.

Ținând cont de această experiență istorică, aș fi tentat să cred că, deși vom găsi frumusețe în legile finale ale naturii, nu vom găsi vreun statut aparte pentru viață sau pentru inteligență. Prin urmare, nu vom găsi criterii pentru judecățile de valoare sau pentru judecățile morale. Iar astfel nu vom găsi nici un indiciu privind existența unui Dumnezeu căruia să-i pese de asemenea lucruri. S-ar putea să găsim toate acestea în altă parte, dar nu în legile naturii.

Trebuie să recunosc că uneori natura pare mai frumoasă decât ar fi strict necesar. În fața ferestrei biroului meu de acasă se află un ulm care găzduiește adesea adevărate conclavuri păsărești: gaițe albastre, vrăbii cu gâtul galben și, cea mai frumoasă dintre toate, o pasăre cardinal de un roșu aprins. Deși înțeleg destul de bine

cum au evoluat penele viu colorate dintr-o competiție nupțială, nu mă pot împiedica să-mi închipui pentru o clipă că toată această frumusețe ne-a fost dată ca să ne bucurăm de ea. Dar Dumnezeuul păsărilor și al copacilor ar trebui să fie și Dumnezeuul malformațiilor genetice și al cancerului.

Credincioșii au încercat de mii de ani să explice existența suferinței într-o lume ce se presupune a fi condusă de un Dumnezeu bun. Ei au găsit soluții ingenioase făcând apel la diferite planuri divine. Nu voi încerca să analizez aceste soluții, și cu atât mai puțin să adaug una proprie. Amintirea Holocaustului mă face să privesc cu indiferență încercările de a găsi explicații pentru căile Domnului. Dacă există un Dumnezeu care are planurile lui în privința oamenilor, atunci El s-a străduit mult să-și ascundă grija față de noi. Mi s-ar părea o lipsă de politețe, dacă nu o impietate, să deranjăm un asemenea Dumnezeu cu rugăciunile noastre.

Nu toți oamenii de știință ar fi de acord cu perspectiva mea sumbră asupra legilor finale. Nu cunosc pe nimeni care să susțină deschis că avem dovezi științifice pentru existența unei ființe divine, dar unii oameni de știință pretind că în natură viața inteligentă are un statut aparte. Desigur, toată lumea știe că din punct de vedere practic biologia și psihologia trebuie studiate în termenii lor proprii, dar asta nu înseamnă că viața sau inteligența au un statut aparte; același lucru e valabil în cazul chimiei sau al hidrodinamicii. Pe de altă parte, dacă în legile finale, în punctul de convergență al săgeților explicative, am găsi un rol aparte pentru viața inteligentă, am putea trage concluzia că acel creator care a stabilit aceste legi ne-a acordat cumva un interes deosebit.

John Wheeler este impresionat de faptul că, în conformitate cu interpretarea standard a mecanicii cuantice potrivit școlii de la Copenhaga, despre un sistem fizic nu se poate spune că are valori bine definite pentru mărimi cum ar fi poziția, energia sau impulsul, până când acestea nu sunt măsurate de aparatul unui observator. După Wheeler, pentru ca mecanica cuantică să aibă sens este necesară existența unui anumit tip de viață inteligentă. În ultimul timp Wheeler a mers și mai departe și a spus despre viața inteligentă nu numai că trebuia să apară, dar că trebuie și să pătrundă în întreg universul pentru ca fiecare bit de informație privind starea

fizică a universului să fie până la urmă observat. Concluziile lui Wheeler oferă un bun exemplu în privința pericolelor ce ne pândesc atunci când luăm prea în serios doctrina pozitivismului care spune că știința ar trebui să se ocupe numai de lucrurile ce pot fi observate. Alți fizicieni, între care mă număr și eu, preferă să adopte o perspectivă diferită, realistă, asupra mecanicii cuantice, considerând o funcție de undă care poate descrie laboratoarele și observatorii la fel ca și atomii și moleculele, determinată de legi care nu depind de existența sau inexistența unor observatori.

Unii oameni de știință dau mare importanță faptului că anumite constante fundamentale au valori ce par extrem de fin reglate pentru apariția vieții inteligente în univers.* Nu e încă limpede cât de întemeiată e această remarcă, dar, presupunând că așa stau lucrurile, nu rezultă de aici existența unui scop divin. În unele teorii cosmologice moderne, așa-numitele constante ale naturii (cum sunt masele particulelor elementare) diferă de la un loc la altul, de la un moment la altul sau chiar de la un termen al funcției de undă a universului la altul. Dacă acest lucru e adevărat, atunci, după cum am văzut, orice om de știință care studiază legile naturii trebuie să trăiască într-o parte a universului în care constantele naturii iau valori favorabile evoluției vieții inteligente.

Pentru o analogie, să presupunem că există o planetă numită Pământul-prim, identică în toate privințele cu Pământul nostru, cu excepția faptului că pe această planetă oamenii au descoperit știința fizicii fără a ști ceva despre astronomie. (De pildă, ne putem imagina că suprafața Pământului-prim e acoperită tot timpul de nori groși.) La fel ca pe Pământ, studenții de pe Pământul-prim vor găsi tabelele constantelor fundamentale la sfârșitul manualelor de fizică. Aceste tabele vor conține viteza luminii, masa electronului și așa mai departe, împreună cu o altă constantă „fundamentală” având valoarea de 1,99 calorii pe minut pe centimetru pătrat, care dă energia ce ajunge la suprafața Pământului-prim provenind de la o sursă exterioară necunoscută. Pe Pământ ea se numește constanta solară fiindcă știm că această energie provine

* Ideea e prezentată pe larg în cartea lui Martin Rees *Doar șase numere* (Humanitas, 2006). (N. red.)

de la Soare, dar nimeni pe Pământul-prim nu ar avea cum să știe de unde provine această energie sau de ce constanta ia tocmai această valoare. Un fizician de pe Pământul-prim ar putea să remarce că valoarea observată a acestei constante e extrem de fin reglată pentru apariția vieții. Dacă Pământul-prim ar primi mult mai mult sau mult mai puțin de 2 calorii pe minut pe centimetru pătrat, apa oceanelor ar deveni vapori sau gheață, lăsând Pământul-prim fără apă lichidă sau alt înlocuitor rezonabil în care să fi evoluat viața. Fizicianul ar putea trage concluzia că această constantă de 1,99 calorii pe minut pe centimetru pătrat a fost reglată de Dumnezeu în folosul omului. Fizicienii mai sceptici de pe Pământul-prim ar putea spune că asemenea constante vor fi în cele din urmă explicate de legile finale ale fizicii și că e doar un accident norocos faptul că ele au valori favorabile vieții. De fapt, cu toții se înșală. Când locuitorii Pământului-prim vor căpăta cunoștințe de astronomie, vor afla că planeta lor primește 1,99 calorii pe minut pe centimetru pătrat deoarece, la fel ca Pământul, se află la aproximativ 93 de milioane de mile distanță de un soare care produce 5 600 de milioane de milioane de milioane de calorii pe minut. În același timp însă vor vedea că există alte planete, mai apropiate de soarele lor, care sunt prea fierbinți pentru viață, și mai multe planete, mai îndepărtate de soarele lor, care sunt prea reci pentru viață, precum și nenumărate alte planete ce se rotesc în jurul altor stele, dintre care numai o mică parte sunt propice vieții. Când vor afla câte ceva despre astronomie, fizicienii din cele două tabere vor înțelege în cele din urmă că motivul pentru care locuiesc într-o lume care primește aproximativ 2 calorii pe minut pe centimetru pătrat este acela că nu există nici un alt fel de lume în care *ar putea* trăi. Noi, în porțiunea noastră de univers, am putea fi asemenea locuitorilor Pământului-prim înainte de a afla despre astronomie, dar rolul planetelor ascunse vederii noastre ar fi jucat de alte părți ale universului.

Aș merge mai departe. Pe măsură ce descoperim principii fizice tot mai profunde, ele par să aibă tot mai puțină legătură cu noi. De pildă, la începutul anilor '20 se credea că singurele particule elementare sunt electronul și protonul, considerate pe atunci ingredientele din care suntem alcătuiți noi și lumea noastră. Când

au fost descoperite particule noi cum e neutronul, s-a crezut inițial că ele trebuie să fie constituite din electroni și protoni. Astăzi lucrurile stau cu totul altfel. Nu mai suntem atât de siguri ce semnificație are noțiunea de particulă elementară, dar am învățat o lecție importantă: faptul că particulele sunt prezente în materia obișnuită nu are nici o legătură cu gradul lor de simplitate. Aproape toate particulele ale căror câmpuri apar în modelul standard modern al particulelor și interacțiunilor se dezintegrează atât de repede încât ele nu sunt prezente în materia obișnuită și nu joacă nici un rol în viața oamenilor. Electronii sunt o parte esențială a lumii noastre de zi cu zi; particulele numite miuoni și tauoni nu au aproape nici o importanță pentru viața noastră; și totuși, în felul în care apar în teoriile noastre, electronii nu joacă un rol privilegiat în raport cu miuonii și tauonii. În termeni mai generali, nimeni nu a descoperit vreodată o corelație între importanța *vreunui lucru* pentru noi și importanța lui pentru legile naturii.

Desigur, cei mai mulți nu de la descoperirile științifice așteaptă să afle ceva despre Dumnezeu. John Polkinghorne a pledat cu convingere pentru o teologie „plasată într-un domeniu al discursului uman unde își găsește loc și știința“, care să se întemeieze pe o experiență religioasă de tipul revelației la fel cum știința se întemeiază pe experiment și observație. Cei care cred că au avut experiențe religioase proprii trebuie să judece ei înșiși calitatea acelor experiențe. Dar marea majoritate a adeptilor religiilor lumii nu se bazează pe experiența religioasă proprie, ci pe revelații care se presupune că au fost trăite de alții. S-ar putea crede că la fel se întâmplă și cu fizicianul teoretician care se bazează pe experimentele altora, dar există o deosebire foarte importantă. Descoperirile a mii de fizicieni individuali converg spre o înțelegere satisfăcătoare (deși incompletă) a realității fizice. În schimb, afirmațiile despre Dumnezeu, sau toate cele care provin din revelația religioasă, diverg. După mii de ani de analiză teologică, nu suntem mai aproape de o înțelegere larg acceptată a învățăturilor revelației religioase.

Există și o altă diferență între experiența religioasă și experimentul științific. Învățăturile experienței religioase ne pot aduce multă alinare, spre deosebire de perspectiva abstractă și impersonală

la care ajungem prin cercetarea științifică. Spre deosebire de știință, experiența religioasă poate sugera că viața noastră are un sens, că avem un rol de jucat în marea dramă cosmică a păcatului și a mântuirii, și ne promite un fel de continuare după moarte. Tocmai din aceste motive învățăturile experienței religioase mi se par profund marcate de pecetea dorințelor noastre.

În cartea mea din 1977 *Primele trei minute*, am comis imprudența să afirm că „cu cât universul pare mai comprehensibil, cu atât el pare mai lipsit de sens“. Nu am vrut să spun că știința ne învață că universul e lipsit de sens, ci că universul însuși nu sugerează nici un sens. M-am grăbit să adaug că putem noi înșine inventa un rost pentru viețile noastre, de pildă acela de a încerca să înțelegem universul. Dar răul a fost făcut: de atunci n-am izbutit să scap de fraza asta. Recent, Alan Lightman și Roberta Braver au publicat interviuri cu douăzeci și șapte de cosmologi și fizicieni, dintre care majoritatea au fost întrebați la sfârșitul interviului ce credeau despre această remarcă. Zece dintre intervieuați au fost mai mult sau mai puțin de acord cu mine, iar treisprezece nu, dar dintre cei treisprezece trei nu au fost de acord fiindcă nu înțelegeau cum s-ar putea *aștepta* cineva ca universul să aibă un sens. Astronomul Margaret Geller de la Harvard a spus: „De ce să aibă un sens? Ce sens? E doar un sistem fizic, ce sens poate fi aici? Mereu m-a uimit afirmația asta.“ Astrofizicianul Jim Peebles de la Princeton a spus: „Vreau să cred că suntem praf și pulbere.“ (Peebles credea de asemenea că avusesem o zi proastă.) Alt astrofizician de la Princeton, Edwin Turner, a fost de acord cu mine, dar a bănuț că făcusem această remarcă pentru a-mi necăji cititorii. Răspunsul care mi-a plăcut cel mai mult a venit din partea unui coleg de la Universitatea din Texas, astronomul Gerard de Vaucouleurs. El a spus că i se pare că remarca mea era „nostalgică“. Era într-adevăr nostalgia pentru o lume în care cerurile vesteau slava lui Dumnezeu.

Cu vreun secol și jumătate în urmă, Matthew Arnold găsea în refluxul mării o metaforă pentru retragerea credinței religioase și auzea în sunetul apei „o notă de tristețe“. Ar fi minunat să găsim în legile naturii planul pregătit de un creator preocupat de noi, plan în care oamenii să joace un rol aparte. E trist să ne îndoim că așa

va fi. Între colegii mei există unii care spun că prin contemplarea naturii regăsesc întreaga mulțumire spirituală la care alții ajungeau în trecut prin credința într-un Dumnezeu implicat. Poate că unii dintre ei chiar simt asta. Eu unul nu. Și nu mă ajută cu nimic să identific legile naturii cu un Dumnezeu îndepărtat și apatic, așa cum făcea Einstein. Cu cât ne cizelăm mai mult ideea de Dumnezeu pentru a o face plauzibilă, cu atât ea pare mai lipsită de sens.

Printre oamenii de știință din ziua de azi, eu sunt probabil oarecum atipic, fiindcă mă preocupă asemenea lucruri. În rarele prilejuri când discuțiile de la masa de prânz sau de la ceai ating tema religiei, majoritatea colegiilor mei fizicieni se arată ușor surprinși și amuzați că mai există cineva care ia în serios toate astea. Mulți fizicieni își păstrează în mod convențional apartenența la credința părinților lor, ca o formă de identificare etnică sau pentru nunți și înmormântări, dar puțini dau atenție teologiei religiei lor. Cunoscut doi specialiști în relativitatea generală care sunt catolici cucernici, câțiva fizicieni teoreticieni care respectă tradițiile evreiești, un fizician experimentator care s-a reconvertit la creștinism, un fizician teoretician musulman fervent și un fizician-matematician care ocupă un rang înalt în ierarhia Bisericii Anglicane. Există fără îndoială și alți fizicieni profund religioși pe care nu-i cunosc și care își păstrează opiniile pentru sine. Dar, din câte îmi dau seama din propriile mele observații, astăzi cei mai mulți fizicieni sunt atât de puțin preocupați de religie încât nici măcar nu pot fi considerați atei practicanți.

Oamenii religioși cu vederi liberale sunt într-un anume sens chiar mai diferiți în plan spiritual de oamenii de știință decât fundamentalistii și alți credincioși conservatori. Cel puțin conservatorii, la fel ca oamenii de știință, îți spun că ei cred în ce cred fiindcă e adevărat, nu fiindcă asta îi face mai buni sau mai fericiți. Se pare că mulți credincioși cu vederi liberale din ziua de azi consideră că oameni diferiți pot crede în lucruri diferite care se exclud reciproc, fără ca vreunul dintre ei să greșească, atât timp cât credința fiecăruia „are un efect bun asupra lui“. Unul crede în reîncarnare, altul în rai și iad, al treilea în dispariția sufletului prin moarte, dar nu poți să spui că vreunul se înșală din moment ce pe fiecare îl înalță spiritual propria sa credință. Pentru a folosi

cuvintele lui Susan Sontag, suntem înconjurați de o „pietate fără conținut“. Toate acestea îmi aduc aminte de o poveste despre Bertrand Russell, care în 1918 a fost condamnat la închisoare pentru că se opunea războiului. Urmând procedura obișnuită a închisorii, un gardian l-a întrebat pe Russell care este religia lui, iar Russell a răspuns că e agnostic. Gardianul a părut nedumerit pentru o clipă, iar apoi, luminat, a zis: „E în regulă. Cu toții ne închinăm aceluiași Dumnezeu, nu-i așa?“

Wolfgang Pauli a fost întrebat odată dacă un anumit articol de fizică prost conceput era greșit. El a răspuns că termenul e prea blând – articolul nu era nici măcar greșit. După părerea mea, conservatorii greșesc în credința lor, dar cel puțin ei nu au uitat ce înseamnă să crezi cu adevărat în ceva. Credincioșii cu vederi liberale nici măcar nu greșesc.

Auzim deseori că lucrul important în religie nu e teologia – important e cum ne ajută să trăim. Foarte ciudat, existența și natura lui Dumnezeu, virtutea și păcatul, raiul și iadul nu sunt importante! Înclin să cred că oamenii nu consideră importantă teologia presupusei lor religii fiindcă nu pot recunoaște că nu cred nimic din ea. Dar de-a lungul istoriei și în multe părți din lumea de azi oamenii au crezut într-o teologie sau alta, iar pentru ei acest lucru a fost foarte important.

Confuzia intelectuală a liberalismului religios îi poate deruta pe mulți, dar religia dogmatică conservatoare e cea nocivă. Ea a avut, desigur, și importante contribuții morale și artistice. Nu e aici locul să punem în balanță aceste contribuții ale religiei cu îndelungata și sângeroasa poveste a cruciadei, jihadului, inchiziției și pogromului. Vreau totuși să spun că atunci când facem asemenea judecăți nu trebuie să presupunem că persecuția religioasă și războaiele sfinte sunt perversiuni ale religiei adevărate. Această presupunere mi se pare simptomul unei atitudini larg răspândite față de religie – un adânc respect combinat cu o profundă lipsă de interes. În multe din marile religii ale lumii Dumnezeu impune înalte exigențe în privința credințelor și formelor de devoțiune. Nu e de mirare că *unii* dintre oamenii care iau aceste învățături în serios consideră cu toată sinceritatea că aceste porunci divine sunt

incomparabil mai importante decât toate acele virtuți seculare cum sunt toleranța, compasiunea sau rațiunea.

Pe întreg cuprinsul Asiei și Africii sporesc forțele întunecate ale fanatismului religios, iar rațiunea și toleranța nu se află în siguranță nici măcar în statele seculare din Occident. Istoricul Hugh Trevor-Roper spunea că răspândirea spiritului științific în Europa secolelor al XVII-lea și al XVIII-lea a pus în cele din urmă capăt arderii pe rug a vrăjitoarelor. S-ar putea să fie din nou nevoie să ne bazăm pe influența științei pentru a menține o lume sănătoasă. Nu certitudinea cunoașterii științifice e potrivită pentru acest rol, ci *incertitudinea* ei. Văzând cum oamenii de știință se răzgândesc întruna în legătură cu probleme ce pot fi studiate direct prin experimente de laborator, cum putem lua în serios pretențiile tradiției religioase sau ale cărților sacre în privința unei cunoașteri al cărei obiect se află în afara experienței umane?

Desigur, știința a contribuit și ea la sporirea suferinței din lumea noastră, dar în general dându-ne mijloacele de a ne omorî unul pe altul, nu și motivul. Acolo unde autoritatea științei a fost invocată pentru a justifica ororile, aceasta s-a întâmplat prin perversiuni ale științei cum sunt rasismul nazist și „eugenia“. După cum spunea Karl Popper, „e limpede că iraționalismul și nu raționalismul poartă răspunderea întregii ostilități și agresioni naționale, atât înainte, cât și după Cruciade, dar nu cunosc nici un război purtat în scop «științific» sau inspirat de oamenii de știință“.

Din păcate, nu cred că pot pleda cu argumente raționale cauza modului științific de a gândi. David Hume a înțeles cu mult timp în urmă că, făcând apel la experiența științifică încununată de succes din trecut, presupunem implicit valabilitatea modului de gândire pe care încercăm să-l justificăm. La fel, toate argumentele logice pot fi combătute prin simplul refuz de a judeca logic. Prin urmare, nu putem ignora întrebarea: dacă nu găsim consolarea sufletească dorită în legile naturii, de ce *nu* ar trebui s-o căutăm altundeva – într-o autoritate spirituală sau alta, ori într-o credință la care ajungem pe cont propriu?

Alegerea între a crede și a nu crede nu se află în întregime în mâinile noastre. S-ar putea să fiu mai fericit și să am un comportament mai elegant dacă știu că descind din împărății

Chinei, dar nici un efort de voință din partea mea nu mă poate face să cred asta, la fel cum nu-mi pot împiedica inima să bată. Se pare totuși că mulți oameni pot exercita un anumit control asupra a ceea ce cred, iar ei aleg să creadă în ceea ce își închipuie că-i va face mai buni sau mai fericiți. Cea mai interesantă descriere din câte cunosc a felului în care poate funcționa acest control apare în romanul lui George Orwell *1984*. Eroul, Winston Smith, și-a notat în jurnalul lui că „libertatea este libertatea de a spune că doi și cu doi fac patru”. Inchizitorul, O’Brien, consideră că aici e o provocare și vrea să-l oblige pe Smith să se răzgândească. Sub tortură, Smith e de acord să spună că doi și cu doi fac cinci, dar nu asta urmărește O’Brien. În cele din urmă, durerea devine atât de cumplită, încât, ca să scape de ea, Smith reușește pentru o clipă să se convingă pe sine că doi și cu doi chiar *fac* cinci. O’Brien e mulțumit, iar tortura încetează. Într-un mod oarecum asemănător, suferința confruntării cu perspectiva morții noastre și a celor dragi ne îndeamnă să îmbrățișăm credințe care alină această suferință. Dacă reușim să ne ajustăm astfel credințele, de ce să n-o facem?

Nu văd nici un motiv științific sau logic pentru a nu căuta consolare prin ajustarea credințelor noastre – doar unul moral, o problemă de onoare. Ce am crede despre cineva care a izbutit să se convingă pe sine că e hărăzit să câștige la loterie fiindcă are nevoie disperată de bani? Unii l-ar putea invidia pentru speranțele lui consolatoare, dar mulți alții ar spune nu reușește să se poarte ca un adult și ca un om rațional care vede lucrurile așa cum sunt. La fel cum fiecare din noi, maturizându-se, a trebuit să învețe să nu confunde dorințele cu realitatea în privința unor lucruri obișnuite cum e loteria, specia noastră, maturizându-se, a trebuit să învețe că nu jucăm rolul principal într-o mare dramă cosmică.

Nu cred însă nici o clipă că știința va putea oferi vreodată consolare pe care a adus-o religia în confruntarea cu moartea. Cea mai frumoasă expresie a acestei provocări existențiale din câte cunosc eu se află în *Istoria ecleziastică a Angliei*, scrisă de Beda Venerabilul pe la 700 d.Cr. Beda povestește cum regele Edwin al Northumbriei a ținut în anul 627 un consiliu pentru a hotărî ce religie să fie adoptată în regatul său și atribuie următoarele cuvinte unuia din curtenii de vază ai regelui:

Majestate, dacă ar fi să comparăm viața de acum a omului pe lumea asta cu acel timp despre care nu știm nimic, găsesc că ea seamănă cu zborul grăbit al unei vrăbii stinghere prin sala de ospete în care stați la masă într-o zi de iarnă alături de curtenii și sfetnicii majestății voastre. În mijloc arde un foc vesel care încălzește sala; afară vuiesc furtunile iernii, cu ploi și zăpezi. Vrabia intră iute printr-o ușă a sălii și iese prin alta. Câtă vreme se află înăuntru, e la adăpost de urgiile iernii, dar după câteva clipe de tihnă dispare în lumea înghețată de unde a venit. Întocmai la fel, omul se află pe lume pentru un scurt răgaz, dar despre ce a fost înaintea acestei vieți sau despre ce va urma nu știm nimic.

E o tentație aproape irezistibilă să crezi, împreună cu Beda și Edwin, că trebuie să existe ceva pentru noi în afara sălii de ospete. Onoarea de a rezista acestei tentații e doar un palid substitut pentru consolările religiei, dar poți găsi și în ea mulțumire.

CAPITOLUL XII

În districtul Ellis

*Mame, nu lăsați copiii să devină cowboy,
Să-și ia chitara și să urce la volan.
Faceți din ei doctori sau avocați.*

ED și PATSY BRUCE

Districtul Ellis, Texas, se află în inima a ceea ce odinioară era cea mai mare regiune cultivatoare de bumbac din lume. Nu sunt greu de găsit urme ale vechii prosperități de pe vremea bumbacului în Waxahachie, capitala districtului. Centrul orașului se fălește cu tribunalul districtului, o mare construcție din granit roz datând din 1895, străjuită de un înalt turn cu ceas, iar din piața centrală pornesc câteva străzi cu frumoase case victoriene, ca și cum strada Brattle din Cambridge ar fi fost mutată în sud-vest. Dar acum districtul e mult mai sărac. Deși încă se mai cultivă bumbac alături de grâu și porumb, prețurile nu mai sunt ca altădată. Dallas este la patruzeci de minute de mers cu mașina spre nord, pe autostrada 35, iar câțiva locuitori bogați din Dallas s-au mutat la Waxahachie, atrași de liniștea rurală, dar industriile aviatică și informatică în plin avânt din Dallas și Fort Worth nu s-au mutat și ele în districtul Ellis. În 1988 rata șomajului în Waxahachie se menținea la 7%. Așa se face că s-a produs o mare agitație în jurul tribunalului districtual atunci când, pe 10 noiembrie 1988, s-a anunțat că districtul Ellis fusese ales drept loc de amplasare a celui mai mare și mai costisitor instrument științific din lume, Superacceleratorul Supraconductor.

Planurile pentru superaccelerator începuseră cu vreo șase ani în urmă. La acea vreme, Ministerul Energiei se ocupa de un proiect ce întâmpina multe dificultăți, numit ISABELLE, aflat deja în construcție la Laboratorul Național Brookhaven din Long Island. ISABELLE se dorise a fi urmașul acceleratorului de la Fermilab,

dintr-o suburbie a orașului Chicago, principalul accelerator american pentru cercetarea experimentală din fizica particulelor elementare. După începerea lucrărilor în 1978, proiectul ISABELLE a fost întârziat vreme de doi ani de niște probleme apărute în proiectarea magnetilor supraconductori care aveau rolul de a focaliza și direcționa fasciculele de protoni ale lui ISABELLE. Dar a existat și o altă problemă, mai gravă, legată de ISABELLE: deși la intrarea în funcțiune ar fi fost cel mai puternic accelerator din lume, probabil că n-ar fi fost suficient de puternic pentru a răspunde la întrebarea cea mai arzătoare din fizica particulelor elementare – cum este ruptă simetria care leagă interacția slabă de cea electromagnetică.

Descrierea forțelor slabă și electromagnetică din modelul standard al particulelor elementare se bazează pe o simetrie *exactă* în modul în care aceste forțe apar în ecuațiile teoriei. Dar, după cum am văzut, această simetrie nu e prezentă în soluțiile ecuațiilor – proprietățile particulelor și forțelor. Orice versiune a modelului standard care permite o asemenea rupere de simetrie ar trebui să aibă trăsături care nu au fost încă descoperite experimental: fie noi particule interacționând slab, numite particule Higgs, fie noi forțe extra-tari. Dar încă nu știm care dintre aceste trăsături e prezentă cu adevărat în natură, iar încercarea noastră de a merge dincolo de modelul standard e blocată de această incertitudine.

Singura cale sigură de a lămuri această problemă e efectuarea unor experimente în care să avem la dispoziție un bilion de volți pentru crearea particulelor Higgs sau a particulelor masive menținute prin forțe extra-tari. În acest scop s-a dovedit că e nevoie să se cedeze unei perechi de protoni care se ciocnesc o energie totală de circa 40 de bilioane de volți, fiindcă energia protonului se împarte între cuarcii și gluonii din care acesta e compus, iar numai aproximativ a patruzecoa parte din energie e disponibilă pentru producerea de noi particule în ciocnirea dintre un cuarc sau un gluon dintr-un proton cu un cuarc sau gluon din celălalt proton. Mai mult, nu e suficient să bombardăm cu un fascicul de protoni având energia de 40 de bilioane de volți o țintă în repaus, fiindcă în acest caz aproape întreaga energie a protonilor incidenti s-ar pierde prin reculul protonilor ciocniți. Pentru a fi siguri de

rezolvarea corectă a problemei ruperii simetriei electroslabă avem nevoie de două fascicule de protoni de 20 de bilioane de volți care să se ciocnească frontal, așa încât impulsurile celor doi protoni să se anuleze și nimic din energie să nu se piardă prin recul. Din fericire, putem fi siguri că un accelerator care produce fascicule intense de protoni care se ciocnesc având energia de 20 de bilioane de volți poate rezolva problema ruperii simetriei electroslabă – va găsi fie particule Higgs, fie dovada existenței unor noi forțe tari.

În 1982, printre fizicienii experimentatori și teoreticieni a început să circule ideea că proiectul ISABELLE trebuie abandonat și începută construcția unui nou accelerator mult mai puternic, care să poată rezolva problema ruperii simetriei electroslabă. În acea vară, un grup aflat sub patronajul Societății Americane de Fizică a realizat primul studiu detaliat al unui accelerator care să producă fascicule de protoni având energii de 20 de bilioane de volți, de aproximativ cincizeci de ori mai mari decât cele plănuite pentru ISABELLE. În februarie anul următor, un subcomitet al Comitetului Consultativ pentru Fizica Energiilor Înalte din cadrul Ministerului Energiei, sub conducerea lui Stanley Wojcicki de la Stanford, a început o serie de întruniri în vederea studierii variantelor pentru acceleratorul de nouă generație. Subcomitetul s-a întâlnit la Washington cu consilierul științific al președintelui, Jay Keyworth, care a lăsat să se înțeleagă că administrația va privi favorabil un nou proiect la scară mare.

Subcomitetul lui Wojcicki și-a ținut întrunirea finală între 29 iunie și 1 iulie 1983 la Laboratorul Ciclotronului Nevis al Universității Columbia, districtul Westchester. Fizicienii întruniți au recomandat în unanimitate construirea unui accelerator care să poată produce fascicule de protoni cu energii de 10–20 de bilioane de volți. Acest vot, în sine, nu ar fi atras prea mult atenția; în general, în orice domeniu oamenii de știință recomandă noi instalații de cercetare. Mult mai important a fost votul de zece la șapte care recomanda întreruperea activității la proiectul ISABELLE. A fost o decizie extrem de dificilă, contestată energic de Nick Samios, directorul de la Brookhaven. (Ulterior, Samios avea să numească acest vot „una dintre cele mai tâmpite hotărâri luate vreodată în fizica energiilor înalte“.) Nu numai că decizia a

subliniat sprijinul subcomitetului pentru noul mare accelerator, dar a făcut și să fie politic foarte dificil ca Ministerul Energiei să ceară în continuare Congresului fonduri pentru ISABELLE, iar odată întrerupt proiectul ISABELLE și fără vreun alt proiect început, Ministerul Energiei nu ar fi avut nici un proiect în domeniul energiilor înalte.

Zece zile mai târziu, recomandările subcomitetului Wojcicki au fost aprobate unanim de forul superior, Comitetul Consultativ pentru Fizica Energiilor Înalte din cadrul Ministerului Energiei. Noul accelerator a primit atunci numele sub care e cunoscut și azi: Superacceleratorul Supraconductor, pe scurt SSC. Pe 11 august, Ministerul Energiei a autorizat Comitetul Consultativ pentru Fizica Energiilor Înalte să schițeze un plan de cercetare și dezvoltare pentru proiectul SSC, iar pe 16 noiembrie 1983 Donald Hodel, ministrul Energiei, a anunțat decizia ministerului său de a înceta lucrul la ISABELLE și a cerut comitetelor de resort ale Casei Albe și Senatului autorizația de a dirija fondurile de la ISABELLE către SSC.

Studierea mecanismului de rupere a simetriei electrolabe nu a fost nicidecum singurul argument în favoarea superacceleratorului. De obicei noile acceleratoare, cum sunt cele de la CERN și Fermilab, sunt construite în speranța că, ajungând la energii mai înalte, acceleratorul va permite descoperirea unor noi fenomene revelatoare. Această speranță s-a împlinit aproape întotdeauna. De pildă, Sincrotronul Super Proton a fost construit la CERN fără o idee clară asupra scopului său; desigur, nimeni nu știa că experimentele folosind fasciculele de neutrini ale acestui accelerator vor duce la descoperirea forțelor slabe ale curentului neutru, descoperire care în 1973 a confirmat actuala noastră teorie unificată a forțelor slabe și electromagnetice. Marile acceleratoare de astăzi sunt descendenții cicloatroanelor lui Ernest Lawrence de la Berkeley de la începutul anilor '30, care au fost construite pentru a accelera protoni la energii suficient de mari pentru a învinge respingerea electrică din jurul nucleului atomic. Lawrence nu știa ce se va descoperi atunci când protonii vor intra în nucleu. Uneori o descoperire poate fi identificată dinainte; de exemplu, Bevatronul de la Berkeley a fost construit în anii '50 anume pentru a avea suficientă energie (aproximativ 6 miliarde de volți) pentru a crea

antiprotoni, antiparticulele protonilor pe care îi găsim în toate nucleeele atomice obișnuite. Marele accelerator electron-pozitron care funcționează acum la CERN a fost construit inițial cu scopul de a se obține suficientă energie pentru a produce un număr foarte mare de particule Z, supunând astfel modelul standard la teste experimentale severe. Dar chiar și în cazul în care proiectarea unui nou accelerator e motivată de anumite probleme particulare, descoperirile cele mai importante pot fi cu totul neașteptate. Acesta a fost cu siguranță cazul Bevatronului; el a creat într-adevăr antiprotoni, dar cea mai importantă realizare a fost producerea unei mari varietăți de noi particule neașteptate, care interacționau prin forța tare. Prin urmare, s-a considerat de la bun început că experimentele de la superaccelerator pot duce la descoperiri mai importante chiar și decât mecanismul de rupere a simetriei electrolabe.

Experimentele din acceleratoare de înaltă energie cum e superacceleratorul ar putea rezolva chiar și cea mai importantă problemă a cosmologiei moderne: problema materiei întunecate lipsă. Știm că cea mai mare parte a masei galaxiilor și o fracțiune încă și mai mare din masa roiurilor de galaxii este întunecată, adică nu apare sub forma stelelor luminoase ca Soarele. Însă și mai multă materie întunecată ar trebui să existe conform teoriilor cosmologice în vigoare pentru a explica rata de expansiune a universului. O cantitate atât de mare de materie întunecată nu ar putea exista sub forma atomilor obișnuiți, fiindcă, în acest caz, numărul mare de neutroni, protoni și electroni ar afecta calculele privind abundența elementelor ușoare produse în primele câteva minute de expansiune a universului, așa încât rezultatele calculelor nu ar mai fi în acord cu observațiile.

Așadar, ce este materia întunecată? Fizicienii au emis ani de-a rândul ipoteze asupra a tot felul de particule exotice care ar putea alcătui materia întunecată, dar deocamdată fără vreo concluzie clară. Dacă experimentele din acceleratoare ar dezvălui un nou tip de particule cu viață lungă, atunci prin măsurarea maselor și interacțiunilor lor am putea calcula câte asemenea particule au rămas în urma big bang-ului și am putea vedea dacă ele constituie întreaga materie întunecată din univers sau doar o parte a ei.

Subiectul a căpătat recent o și mai mare importanță, în urma observațiilor efectuate de satelitul Cosmic Background Explorer (COBE) – Exploratorul Fondului Cosmic. Detectorii sensibili de microunde de pe satelit au dezvăluit minuscule diferențe de la o regiune a cerului la alta în temperatura radiației rămase din vremea când universul avea aproximativ trei sute de mii de ani. Se crede că aceste neuniformități în temperatură au apărut din cauza câmpului gravitațional care a fost produs de o distribuție ușor neuniformă a materiei la acea epocă. Acel moment, la trei sute de mii de ani după big bang, a fost de o importanță critică pentru istoria universului; universul a devenit atunci pentru prima dată transparent la radiație și se crede că neuniformitățile în distribuția materiei începeau pe atunci să se contracte sub influența propriei lor gravitații pentru a forma în cele din urmă galaxiile pe care le vedem astăzi pe cer. Dar neuniformitățile în distribuția materiei deduse din măsurătorile lui COBE *nu* sunt galaxii tinere; COBE a studiat doar neregularitățile de dimensiuni foarte mari, mult mai mari decât dimensiunile pe care le-ar fi avut materia dintr-o galaxie actuală atunci când universul avea trei sute de mii de ani. Dacă extrapolăm ce a văzut COBE la scara mult mai redusă a galaxiilor în formare și calculăm astfel gradul de neuniformitate a materiei la aceste scări relativ mici, ajungem într-un impas: neuniformitățile de dimensiunile galaxiilor ar fi fost prea mici pe când universul avea trei sute de mii de ani pentru a deveni, sub influența propriei lor gravitații, galaxiile de azi. O cale de a ieși din impas ar fi să presupunem că neuniformitățile de dimensiunile galaxiilor își începuseră deja condensarea gravitațională în cursul primilor trei sute de mii de ani, astfel încât extrapolarea datelor obținute de COBE la dimensiunile mult mai mici ale galaxiilor nu e valabilă. Dar acest lucru nu e posibil dacă materia din univers este compusă în cea mai mare parte din electroni, protoni și neutroni obișnuiți, deoarece neomogenitățile din această materie obișnuită nu ar fi putut suferi o creștere semnificativă înainte ca universul să devină transparent la radiații; până atunci, orice aglomerare de materie ar fi fost spulberată de presiunea propriei sale radiații. Pe de altă parte, o materie întunecată exotica ce ar fi compusă din particule neutre electric putea deveni transparentă la radiație mult mai

devreme, prin urmare putea să-și fi început condensarea gravitațională la un moment mult mai apropiat de big bang, producând neomogenități la scară galactică mult mai puternice decât cele deduse din extrapolarea rezultatelor obținute de COBE, probabil suficient de puternice pentru a evolua până la galaxiile din prezent. Descoperirea unei particule de materie întunecată produsă în superaccelerator ar valida această ipoteză privind originea galaxiilor și ar lămuri astfel istoria timpurie a universului.

Multe alte lucruri noi ar putea fi descoperite cu acceleratoare precum SSC: particule în interiorul cuarcilor din care sunt alcătuiți protonii; unul dintre superpartenerii particulelor cunoscute, a căror existență e presupusă în teoriile supersimetrice; noi tipuri de forțe legate de noi simetrii interne etc. Nu știm dacă există vreunul din aceste lucruri, iar, dacă există, nu știm dacă poate fi descoperit cu SSC. De aceea era încurajator faptul că știam dinainte că cel puțin o descoperire de mare importanță putea fi făcută cu SSC, mecanismul de rupere a simetriei electrolabe.

După decizia Ministerului Energiei de a construi SSC, au urmat ani de planificare și proiectare înainte de a începe construcția. O îndelungată experiență ne demonstrase că acest gen de lucrare, deși sponsorizată de guvernul federal, e cel mai bine realizată de agenții private, așa încât Ministerul Energiei a încredințat conducerea fazei de cercetare și dezvoltare a proiectului Asociației de Cercetare a Universităților, un consorțiu nonprofit reprezentând 69 de universități care conduseseră lucrările și la Fermilab. La rândul ei, asociația a recrutat pentru supervizare oameni de știință din universități și din industrie, iar noi am încredințat activitatea de proiectare unui grup central de la Berkeley condus de Maury Tigner. În aprilie 1986 grupul central și-a încheiat proiectul: un tunel subteran larg de 10 picioare formând un inel cu o lungime de 83 kilometri (comparabil cu șoseaua de centură a Washington-ului), conținând două fascicule subțiri de protoni de 20 de bilioane de volți circulând în direcții opuse. Protonii urmau să fie menținuți pe traiectoriile lor de 3 840 de magneți deflectorii (fiecare cu o lungime de 17 metri) și focalizați de alți 888 de magneți, magneții conținând împreună în total 41 500 de tone de fier, 19 400 de

kilometri de cablu supraconductor și fiind menținuți la temperatură scăzută de 2 milioane de litri de heliu lichid.

Pe 30 ianuarie 1987 proiectul a fost aprobat de Casa Albă. În aprilie, Ministerul Energiei a început procesul de alegere a amplasamentului, solicitând propunerile statelor interesate. Până la termenul limită de 2 septembrie 1987 se primiseră 43 de propuneri (cântărind împreună aproximativ 3 tone) din partea statelor care doreau să atragă proiectul SSC. Un comitet numit de Academia Națională de Știință și Inginerie a redus numărul de variante la șapte amplasamente „optime”, iar apoi, pe 10 noiembrie 1988, ministrul Energiei a anunțat decizia: SSC urma să fie construit în statul Texas, districtul Ellis.

O parte din motivul alegerii se află adânc sub solul texan. Întinzându-se spre nord de la Austin la Dallas, există o formațiune geologică veche de 80 de milioane de ani numită Creta din Austin, sedimentată pe fundul unei mări care acoperea o bună parte din Texas în perioada cretacică. Creta e impermeabilă la apă, suficient de moale pentru a se săpa în ea cu ușurință, dar suficient de rezistentă pentru a nu fi necesară consolidarea zidurilor tunelului. Cu greu s-ar putea găsi un material mai bun în care să se sape tunelul superacceleratorului.

Între timp, lupta pentru finanțarea SSC abia începuse. Un moment crucial într-un proiect de acest gen este prima alocare de fonduri pentru construcție. Până atunci proiectul se rezumă la cercetare și dezvoltare, care pot fi întrerupte la fel de ușor cum au fost pornite. Odată începută construcția, întreruperea devine dificilă din punct de vedere politic, fiindcă ar echivala cu recunoașterea tacită a faptului că fondurile de construcție cheltuite anterior au fost irosite. În februarie 1988, președintele Reagan a cerut Congresului 363 de milioane de dolari pentru fondurile de construcție, dar Congresul a aprobat numai 100 de milioane de dolari și a alocat aceste fonduri anume pentru cercetare și dezvoltare, nu pentru construcție.

Proiectul SSC a continuat ca și cum viitorul i-ar fi fost asigurat. În ianuarie 1989 a fost aleasă o echipă de control industrial, iar Roy Schwitters de la Harvard a fost ales director al Laboratorului SSC. Schwitters, un fizician experimentator bărbos dar relativ tânăr,

pe atunci în vârstă de patruzeci și patru de ani, își demonstrase calitățile organizatorice la Acceleratorul Tevatron de la Fermilab, cel mai mare accelerator din Statele Unite. Pe 7 septembrie 1989 am primit vești bune: o comisie consultativă a Senatului a acceptat să se aloce 225 de milioane de dolari pentru SSC în anul fiscal 1990, dintre care 135 de milioane de dolari pentru construcție. Proiectul SSC trecuse în fine de etapa de cercetare și dezvoltare.

Lupta nu s-a încheiat. În fiecare an proiectul SSC apare din nou în fața Congresului pentru finanțare, și în fiecare an sunt aduse aceleași argumente pro și contra. Numai un fizician foarte naiv ar fi surprins să vadă cât de puțin are a face dezbaterea aceasta cu ruperea simetriei electroslabă sau cu legile ultime ale naturii. Dar numai pe un fizician foarte cinic acest lucru nu l-ar întrista.

Motivul cel mai puternic care îi face pe politicieni să se opună proiectului SSC sunt interesele economice imediate ale alegătorilor. Inamicul numărul unu al proiectului în Congres, deputatul Don Ritter, a comparat SSC cu proiectul unui „hârdău de porci” care e promovat numai pentru avantajele politice ale deputaților influenți, numindu-l un „hârdău de cuarci”. Înainte de alegerea amplasamentului pentru SSC, a existat o largă susținere a proiectului din partea celor care sperau că va fi amplasat în propriile lor state. Când am depus mărturie în favoarea SSC, în 1987, în fața unui comitet senatorial, unul dintre senatori mi-a spus că aproape o sută de senatori erau în favoarea lui, dar după ce se va anunța amplasarea vor fi numai doi. Sprijinul a scăzut fără îndoială, dar estimarea senatorului s-a dovedit mult prea pesimistă. Aceasta se datorează poate faptului că anumite companii de pe întreg cuprinsul țării primesc contracte pentru componentele SSC, dar eu cred că reflectă și o anumită înțelegere a importanței intrinseci a proiectului.

Mulți dintre adversarii SSC se leagă de nevoia urgentă de reducere a deficitului federal. Acesta a fost laitmotivul senatorului Dale Bumpers din Arkansas, liderul adversarilor SSC din Senat. Pot înțelege această grijă, dar nu înțeleg de ce reducerea deficitului trebuie să înceapă cu cercetarea de la frontierele științei. Ne putem gândi la multe alte proiecte, de la Stația Spațială la submarinul Seawolf, ale căror costuri sunt mult mai mari și a căror valoare intrinsecă e mult mai mică. Pentru a proteja locurile de muncă

trebuie oare să continuăm aceste proiecte? Dar numărul locurilor de muncă e aproximativ același pentru o sumă cheltuită dată, indiferent dacă e vorba de SSC sau de vreun alt proiect. Poate nu e prea cinic să sugerăm că proiecte precum Stația Spațială și submarinul Seawolf sunt prea bine protejate politic de o rețea de companii aerospațiale și de apărare pentru a fi aruncate la gunoi, lăsând SSC să devină o țintă vulnerabilă și convenabilă pentru un act pur simbolic de reducere a deficitului.

Una dintre temele recurente în dezbaterea privind SSC a fost argumentul așa-zisei științe mari în opoziție cu știința mică. SSC și-a atras adversari din rândurile unor oameni de știință care preferă un stil de știință mai vechi și mai modest: experimente efectuate de un profesor și un student în subsolul universității. Mulți dintre cei care lucrează în laboratoarele gigantice ale acceleratoarelor moderne ar prefera și ei acest stil de fizică, dar, ca urmare a succeselor din trecut, suntem acum confrunțați cu probleme care pur și simplu nu pot fi abordate cu metodele de pe vremea lui Rutherford. Îmi închipui că mulți aviatori au nostalgia zilelor când carlingile erau deschise, dar nu în felul ăsta poți traversa Atlanticul.

Adversitatea față de proiectele „științei mari” cum e SSC vine și din partea unor oameni de știință care ar prefera ca banii să fie cheltuiți pentru alte cercetări (de pildă ale lor). Dar cred că își fac iluzii. Când Congresul a tăiat fondurile pentru SSC, banii nu au fost realocați în știință, ci în proiecte hidrotehnice. Multe dintre ele sunt într-adevăr „porcești” și costă sume care depășesc fondurile cheltuite deja pentru SSC.

SSC a atras de asemenea opoziția celor care bănuiesc că decizia președintelui Reagan de a construi SSC seamănă cu sprijinul său pentru sistemul antirachetă „Războiul stelelor” și stația spațială: un soi de entuziasm irațional pentru orice nou proiect tehnologic grandios. Pe de altă parte, opoziția la SSC mi s-a părut că izvorăște și dintr-un dezgust la fel de irațional față de orice nou proiect tehnologic grandios. Ziariștii au considerat în repetate rânduri că SSC, împreună cu stația spațială, sunt exemple oribile de știință mare, cu toate că stația spațială nu e deloc un proiect științific. Disputa dintre știința mare și știința mică e o bună cale de a evita să judecăm valoarea proiectelor individuale.

Un sprijin politic important pentru SSC vine de la cei care îl privesc ca pe un fel de seră industrială care ar stimula progresul în diferite tehnologii importante: criogenie, proiectarea magneților, informatică etc. Prin atragerea unor oameni de știință excepțional de dotați, SSC ar reprezenta de asemenea pentru America o resursă intelectuală. Fără SSC vom pierde o întreagă generație de fizicieni ai energiilor înalte, care vor trebui să-și efectueze cercetările în Europa sau Japonia. Chiar și cei cărora nu le pasă de descoperirile făcute de acești fizicieni ar trebui să țină cont de faptul că grupul fizicienilor din domeniul energiilor înalte reprezintă un rezervor de talente științifice care a adus contribuții importante pentru țara noastră, de la Proiectul Manhattan până la cercetările curente din programarea paralelă a supercalculatoarelor.

Acestea sunt motive temeinice pentru ca deputații să susțină proiectul SSC, dar ele nu-i interesează pe fizicieni. Urgența dorinței noastre de a vedea dat în funcțiune SSC ține de sentimentul că, fără el, marea noastră aventură intelectuală de căutare a legilor ultime ale naturii s-ar putea opri.

Pe la sfârșitul toamnei lui 1991, m-am dus în districtul Ellis pentru a vedea amplasamentul SSC. Ca mai peste tot în această zonă a Texasului, pământul e ușor vălurit, împânzit de nenumărate pâraiașe străjuite de pâlcuri de plop. Solul nu arăta prea bine în acel moment al anului; majoritatea recoltelor fuseseră strânse, iar câmpiile însămânțate cu grâu de iarnă erau încă pline de noroi. Doar din loc în loc, acolo unde strânsul recoltei fusese întârziat de ploi recente, câmpul era inundat de albul bumbacului. Pe cer patrolau șoimi, sperând să prindă un șoarece pornit în hoinăreală. Nu e ținutul cowboy-lor. Am văzut o turmă de vaci Black Angus și un singur cal alb pe câmp, dar vitele care sunt aduse în țărcurile de la Fort Worth provin în cea mai mare parte din ferme aflate mult mai la nord sau la vest de districtul Ellis. Mergând spre viitorul campus SSC, vezi cum drumurile în stare bună dintre ferme și piețe lasă locul unor drumuri de țară care arată probabil la fel cu cele ale cultivatorilor de bumbac de-acum un secol.

Când am văzut construcțiile ce așteptau să fie demolate sau mutate am înțeles că ajunseseam pe terenul cumpărat de statul Texas

pentru campusul SSC. O milă mai la nord mi-a apărut în față o structură nouă enormă, Centrul de Proiectare a Magneților. Apoi, după un pâlc de stejari, am văzut o instalație de foraj adusă din câmpurile petroliere ale Coastei Golfului ca să foreze un puț de sondaj pentru SSC, larg de 16 picioare și adânc de 265 de picioare, până la baza Cretei din Austin. Am luat o bucată de cretă adusă la suprafață de foreză și mi-am amintit de Thomas Huxley.

În ciuda tuturor construcțiilor și forajelor, știam că finanțarea proiectului risca în continuare să fie întreruptă. Îmi puteam imagina puțurile de sondaj umplute la loc, iar Centrul Magneților abandonat, rămânând ca doar câțiva fermieri să depene amintiri despre un mare laborator științific plănuit odinioară să fie construit în districtul Ellis. Mă aflam poate sub vraja optimismului victorian al lui Huxley, dar refuzam să cred că s-ar putea întâmpla acest lucru sau că în epoca noastră căutarea legilor ultime ale naturii ar putea fi abandonată.*

Nimeni nu știe dacă vreun accelerator ne va permite să facem ultimul pas spre o teorie finală. Am convingerea că aceste instalații sunt urmașii firești ai unei serii de mari instrumente științifice cum sunt acceleratoarele de la Brookhaven, CERN, DESY, Fermilab, KEK și SLAC din ziua de azi, sau ciclotronul lui Lawrence și tubul catodic al lui Thomson, sau chiar, întorcându-ne și mai mult în timp, spectroscopul lui Fraunhofer și luneta lui Galilei. Indiferent dacă legile ultime ale naturii vor fi sau nu descoperite pe timpul vieții noastre, important e să continuăm tradiția de a observa natura și de a ne întreba fără încetare de ce este așa cum este.

* După abandonarea proiectului SSC în 1993, autoritățile districtului Ellis au încercat în repetate rânduri să vândă terenul unde urma să fie amplasat acceleratorul, reușind abia în 2006. Între timp, terenul a fost folosit pentru exerciții militare și pentru turnarea unor filme de acțiune. (*N. red.*)

Note

CAPITOLUL I

- 12 Aristotel consideră că mișcarea unui proiectil e în parte naturală și în parte nenaturală:** Am crezut întotdeauna că Aristotel credea că un proiectil se deplasează în linie dreaptă până când își epuizează impulsul inițial și apoi cade drept în jos, dar nu am putut găsi această afirmație nicăieri în cărțile sale. Un expert în Aristotel, Robert Hankinson de la Universitatea din Texas, mă asigură că de fapt Aristotel nu a afirmat niciodată ceva care să contrazică în asemenea măsură observațiile și că aceasta e o interpretare greșită a perspectivei aristotelice, datând din Evul Mediu.
- 14 Într-adevăr, cuvântul „lege“ a fost rareori folosit în Antichitate:** E. Zilsel, „The Genesis of the Concept of Physical Law“, *Philosophical Review* 51 (1942): 245.
- 14 Clasicistul Peter Green pune limitările științei grecești:** Peter S. Green, *Alexander to Actium: The Historical Evolution of the Hellenistic Age* (Berkeley și Los Angeles: University of California Press, 1990), pp. 456, 475–478.
- 15 Newton prezintă în altă lucrare a sa, *Optica*, modul în care credea că acest scop ar putea fi atins:** Îi sunt recunoscător lui Bengt Nagel pentru că mi-a recomandat folosirea acestui citat.
- 16 Un alt experimentator american, Robert Andrews Millikan:** *The Autobiography of Robert A. Millikan* (New York: Prentice-Hall, 1950), p. 23. Vezi de asemenea o notă a lui K.K. Darrow, *Isis* 41 (1950): 201.
- 16 Un prieten mi-a povestit că pe vremea studenției sale la Cambridge:** Fizicianul Abdus Salam.
- 17 există o mulțime de alte dovezi privind această [...] automulțumire științifică:** Dovezi despre această automulțumire în știința de la sfârșitul secolului XIX au fost culese de istoricul Lawrence Badash de la Berkeley în „The Completeness of Nineteenth-Century Science“, *Isis* 62 (1972): 48–58.
- 18 „Nu e departe ziua când“:** A.A. Michelson, *Light Waves and Their Uses* (Chicago: University of Chicago Press, 1903), p. 163.

- 19 **„legile fizice fundamentale“:** P.A.M. Dirac, „Quantum Mechanics of Many Electron Systems“, *Proceedings of the Royal Society A* 123 (1929):713.
- 20 **După cum spune biograful său, Abraham Pais:** Citat de S. Boxer în *New York Times Book Review*, 26 ianuarie, 1992, p. 3.

CAPITOLUL II

- 23 **Titlul prelegerii sale:** Thomas Henry Huxley, *On a Piece of Chalk*, ed. Loren Eisley (New York: Scribner, 1967).
- 25 **astfel încât absorbția acestor fotoni face ca lumina reflectată să fie verde-albăstrui:** Culoarea exactă diferă de la un compus al cuprului la altul, deoarece energiile stărilor atomice sunt influențate de atomii înconjurători.
- 27 **o listă a întrebărilor deschise:** D.J. Gross, „The Status and Future Prospects of String Theory“, *Nuclear Physics B* (Proceedings Supplement) 15 (1990): 43.
- 28 **zece exemple de întrebări:** E. Nagel, *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation* (New York: Harcourt, Brace, 1961).
- 28 **Newton a dedus faimoasele sale legi ale mișcării în parte din legile anterioare ale lui Kepler:** În conformitate cu legile lui Kepler, orbitele planetelor sunt elipse având Soarele într-unul din focare; viteza fiecărei planete variază în cursul revoluției în jurul Soarelui astfel încât linia ce unește planeta cu Soarele mătură arii egale în intervale de timp egale; pătratele perioadelor sunt proporționale cu cuburile axelor mari ale orbitelor eliptice. Legile lui Newton afirmă că fiecare particulă din univers atrage orice altă particulă cu o forță proporțională cu produsul maselor lor și invers proporțională cu pătratul distanței și stabilesc cum se mișcă un corp sub influența oricărei forțe date.
- 29 **„Atunci când metode teoretice sofisticate sunt aplicate în mod inteligent“:** H.F. Shaefer III, „Methylene: A Paradigm for Computational Quantum Chemistry“, *Science* 231 (1986): 1100.
- 30 **nu suntem siguri că vom ști vreodată să facem aceste calcule:** Mai mulți teoreticieni iau în considerare posibilitatea efectuării calculului ce implică forțele nucleare tari prin reprezentarea spațiului-timp ca o rețea de puncte distincte și folosind calculatoare care operează în paralel pentru a urmări valoarea câmpurilor în fiecare punct. Se speră, dar nu e cert, că prin asemenea metode proprietățile nucleelor ar putea fi deduse din principiile cromodinamicii cuantice. Deocamdată nu s-au putut calcula nici măcar masele protonilor și neutronilor din care sunt alcătuite nucleele.
- 30 **„la baza întregii perspective moderne asupra lumii se află iluzia“:** L. Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, trad. D.F. Pears și

B.F. McGuinness (Londra: Routledge, 1922), p. 181. Cam în același sens, un prieten cu înclinații filozofice, profesorul Philip Bobbitt de la Facultatea de Drept a Universității din Texas, mi-a spus: „Când unui copil care mă întreabă de ce un măr cade pe pământ îi răspund «Din cauza gravitației, dragul meu», nu îi dau de fapt nici o explicație. Descrierile matematice ale lumii înconjurătoare pe care ni le oferă fizica nu sunt explicații...” Sunt de acord, dacă prin gravitație înțelegem doar tendința obiectelor grele de a cădea pe pământ. Pe de altă parte, dacă prin gravitație înțelegem întregul ansamblu de fenomene descrise de teoriile lui Newton și Einstein, fenomene între care se numără fluxul și refluxul, mișcarea planetelor și a galaxiilor, atunci răspunsul că mărul cade din cauza gravitației mi se pare cu siguranță o explicație valabilă. În orice caz, acesta e sensul în care oamenii de știință folosesc cuvântul „explicație”.

- 31 Dacă aplicăm regulile mecanicii cuantice atomilor din care e compusă creta:** Elementele cele mai stabile sunt cele cu un număr de electroni ce se pot aranja împreună în straturi complete; acestea sunt gazele nobile, heliul (doi electroni), neonul (zece electroni), argonul (optsprezece electroni) și așa mai departe. (Aceste gaze sunt numite nobile deoarece, ca urmare a stabilității atomilor lor, ele nu au tendința de a participa la reacții chimice.) Calciul are douăzeci de electroni, astfel încât doi dintre ei rămân în afara straturilor complete ale argonului, putând fi cedați ușor. Oxigenul are opt electroni, insuficienți pentru a completa straturile neonului, astfel încât acceptă cu ușurință doi electroni pentru a-și umple golurile din strat. Carbonul are șase electroni, astfel încât poate fi privit fie ca un heliu cu patru electroni în plus, fie ca un neon cu patru electroni în minus, putând fie să piardă, fie să câștige patru electroni. (Această ambivalență permite atomilor de carbon să formeze legături foarte puternice între ei, ca în cazul diamantului.)
- 31 Numărul de protoni trebuie să fie egal cu numărul de electroni pentru a menține atomul neutru din punct de vedere electric:** Dacă un atom are o sarcină electrică pozitivă sau negativă, el are tendința de a accepta sau ceda electroni până când devine neutru din punct de vedere electric.
- 36 straniile fosile din Burgess Shale:** S.J. Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History* (New York: Norton, 1989).
- 39 Ideea de urgență a fost bine surprinsă:** P. Anderson, *Science* 177 (1972): 393.
- 39 o anumită mărime numită entropie:** Pentru a defini entropia, imaginați-vă că temperatura unui sistem crește lent de la zero absolut. Creșterea entropiei sistemului pe măsură ce acesta primește fiecare nouă cantitate mică de energie termică este egală cu acea energie împărțită la temperatura absolută la care se realizează transferul de căldură.

- 39 entropie care, pentru orice sistem închis, crește mereu cu timpul:** E important de reținut că entropia poate scădea într-un sistem care schimbă energie cu mediul înconjurător. Apariția vieții pe Pământ reprezintă o scădere a entropiei, care e permisă de termodinamică fiindcă Pământul primește energie de la Soare și cedează energie în spațiul cosmic.
- 40 Ernest Nagel a prezentat această situație drept exemplu paradigmatic al reducerii unei teorii la alta:** E. Nagel, *The Structure of Science*, pp. 338–345.
- 40 s-a purtat o bătălie între partizanii noii mecanici statistice și cei care:** Povestea acestei bătălii e relatată de istoricul Stephen Bruce în *The Kind of Motion We Call Heat* (Amsterdam: North-Holland, 1976), în special în secțiunea 1.9 a volumului I.
- 41 explicația faptului că termodinamica se aplică unui anume sistem:** Termodinamica se aplică găurilor negre nu pentru că ele conțin un mare număr de atomi, ci pentru că ele conțin un mare număr de unități de masă fundamentale din teoria cuantică a gravitației, fiecare egală cu aproximativ o sutime de miime de gram și purtând numele de masă Planck. Nu ar fi posibilă aplicarea termodinamicii la o gaură neagră cântărind mai puțin de o sutime de miime de gram.
- 43 „cele mai multe dintre conceptele utile ale chimiei“:** R. Hoffman, „Under the Surface of the Chemical Article“, *Angewandte Chemie* 27 (1988): 1597–1602.
- 43 câteva dintre conceptele utile din chimie care riscă să fie pierdute:** H. Primas, *Chemistry, Quantum Mechanics, and Reductionism*, ediția a 2-a, (Berlin: Springer-Verlag, 1983).
- 43 „nu există nici o parte a chimiei care să nu depindă...“:** L. Pauling, „Quantum Theory and Chemistry“, în *Max Plank Festschrift*, ed. B. Kockel, W. Mocke și A. Papapetrou (Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, 1959), pp. 385–388.
- 43 „Este cu certitudine imposibil“:** A.B. Pippard, „The Invincible Ignorance of Science“, prelegere ținută la Cambridge pe 28 ianuarie 1988, *Contemporary Physics* 29 (1988): 393.
- 44 Unde ar trebui trasă linia de demarcație?** Uneori se afirmă că limbajul este cel care face distincția între om și celelalte animale, iar conștiința apare abia când oamenii încep să vorbească. Totuși, calculatoarele folosesc limbajul și nu par să aibă conștiință, însă bătrâna noastră pisică siameză Tai Tai nu a vorbit niciodată (și a avut o gamă limitată de expresii faciale), dar în toate celelalte privințe prezenta aceleași semne de conștiință ca și oamenii.
- 44 „fantoma din mașină“:** G. Ryle, *The Concept of Mind* (Londra: Hutchinson, 1949).

- 45 **„niciodată să nu mai fie folosite cuvintele *realism* și *realist*“:** G. Gissing, *The Place of Realism in Fiction*, republicată în *Selections Autobiographical and Imaginative from the Works of George Gissing* (Londra: Jonathan Cape and Harrisson Smith, 1929), p. 217.
- 47 **Într-un interviu televizat:** B. Moyers, *A World of Ideas*, ed. B.S. Flowers (New York: Double Day, 1989), pp. 249–262.
- 47 **La fel, atunci când Philip Anderson s-a exprimat în scris împotriva:** P. Anderson, „On the Nature of Physical Laws“, *Physics Today*, decembrie 1990, p. 9.
- 47 **„fenomene anormale legate de conștiință“:** R.G. Jahn și B.J. Dunne, *Foundations of Physics* 16 (1986): 721. Pentru a fi corect, aş adăuga că Jahn își consideră cercetările ca pe o prelungire rezonabilă a interpretării mecanicii cuantice conform școlii de la Copenhaga, nu ca pe o parte a unui program paranormal. Interpretarea cuantică realistă a istoriilor multiple are avantajul că ne ajută să evităm acest gen de confuzie.
- 47 **„deși biroul său [...] este la doar câteva sute de metri de al meu“:** R.G. Jahn, scrisoare către redacție, *Physics Today*, octombrie 1991, p. 13.
- 47 **cu atât mai puțin asupra unui om, care e mult mai mic:** Teoria relativității generale se bazează în mare parte pe principiul că nu există *nici un* efect al câmpurilor gravitaționale asupra unui corp foarte mic aflat în cădere liberă, cu excepția faptului că determină mișcarea sa de cădere. Pământul este în cădere liberă în sistemul solar, prin urmare noi nu simțim pe Pământ câmpul gravitațional al Lunii, al Soarelui sau al oricărui alt corp, cu excepția unor efecte cum sunt mareele, care apar din cauza faptului că Pământul nu e foarte mic.

CAPITOLUL III

- 50 **Consiliul Științific Canadian a atacat recent:** *Science*, 9 august 1991, p. 611.
- 51 **Nu e nici mai mult, nici mai puțin decât înțelegerea faptului că principiile științifice sunt așa cum sunt datorită altor principii științifice mai profunde:** Am numit într-un articol această perspectivă „reducționism obiectiv“; vezi S. Weinberg, „Newtonianism, Reductionism, and the Art of Congressional Testimony“, *Nature* 330 (1987): 433–37. Mă îndoiesc că fraza va fi pe placul filozofilor științei, dar a fost aleasă de un biochimist, Joseph Robinson, ca răspuns la un atac împotriva reducționismului al filozofului H. Kincaid. Vezi J.D. Robinson, „Aims and Achievements of the Reductionist Approach in Biochemistry/Molecular Biology/Cell Biology: A Response to Kincaid“, *Philosophy of Science*, în curs de apariție.

- 51 Omul din subterana lui Dostoievski își închipuie că un savant îi spune:** Fyodor Dostoevsky, *Notes from Underground*, trad. Mirra Ginsburg (New York: Bantam Books, 1974), p. 13.
- 52 Disputa a început atunci când, într-un articol din 1985:** E. Mayr, „How Biology Differs from the Physical Sciences“, în *Evolution at a Crossroads*, ed. D. Depew și B. Weber (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1985), p. 44.
- 52 o afirmație dintr-un articol din *Scientific American*:** S. Weinberg, „Unified Theories of Elementary Particle Interactions“, *Scientific American* 231 (iulie 1974): 50.
- 52 I-am răspuns într-un articol:** S. Weinberg, „Newtonianism“.
- 52 A urmat o corespondență frustrantă:** Pentru o parte din această dezbatere, vezi E. Mayr, „The Limits of Reductionism“, precum și replica mea în *Nature* 331 (1987): 475.
- 53 „este poate subiectul cel mai controversat cu care s-a confruntat vreodată comunitatea fizicienilor“:** R.L. Park, *The Scientist*, 15 iunie 1987 (adaptat după o prelegere la simpozionul „Big Science/Little Science“ de la întrunirea anuală a Societății Americane de Fizică, 20 mai 1987).
- 54 „cu nimic mai profunde“:** P.W. Anderson, scrisoare către *New York Times*, 8 iunie 1986.
- 54 „revoluția ADN a făcut ca o generație de biologi să creadă“:** H. Rubin, „Molecular Biology Running into a Cul-de-sac?“, scrisoare către *Nature* 335 (1988): 121.
- 54 „desigur, natura chimică a unui număr de aspecte necunoscute“:** E. Mayr, *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1982), p. 62.
- 57 Fără îndoială, fizicienii stării condensate vor rezolva în cele din urmă problema supraconductibilității la temperaturi înalte fără nici un ajutor direct din partea fizicienilor particulelor elementare:** Folosesc aici cuvântul „direct“ fiindcă, de fapt, e destul de mare ajutorul indirect pe care diversele ramuri ale fizicii și-l oferă una alteia. În parte, el reprezintă o stimulare intelectuală reciprocă; fizicienii stării condensate și-au ales una dintre principalele lor metode matematice (așa-numita metodă a grupului de renormare) din fizica particulelor, iar fizicienii particulelor au aflat despre fenomenul numit rupere spontană de simetrie din fizica stării condensate. În pledoaria sa în favoarea proiectului SSC susținută în fața comisiei Congresului în 1987, Robert Schrieffer (care împreună cu John Bardeen și Leon Cooper s-a numărat printre fondatorii teoriei moderne a supraconductibilității) a subliniat că fusese călăuzit în unele dintre lucrările lui privind supraconductibilitatea de experiența sa în domeniul teoriilor mezonului din fizica particulelor elementare.

(Într-un articol recent, „John Bardeen and the Theory of Superconductivity“, *Physics Today*, aprilie 1992, p. 46, Schrieffer menționează că în 1957, când a găsit funcția de undă pentru un supraconductor, a fost stimulat de faptul că și-a amintit de cercetările lui Sin-Itiro Tomonaga privind teoria câmpului, din urmă cu douăzeci de ani.) Evident, există și alte căi prin care diversele ramuri ale fizicii se ajută reciproc; de pildă, cerințele legate de puterea superacceleratorului ar face ca proiectul să devină exagerat de costisitor dacă nu ar exista magneți supraconductori, iar radiația de sincrotron emisă ca efect secundar în unele acceleratoare de particule de energie înaltă s-a dovedit de mare importanță în medicină și în studiul materialelor.

- 58 „Aș lămuri problema meritului științific“:** A.M. Weinberg, „Criteria for Scientific Choice“, *Physics Today*, martie 1964, pp. 42–48. Vezi, de asemenea, A.M. Weinberg, „Criteria for Scientific Choice“, *Minerva* 1 (iarna anului 1963): 159–171; „Criteria for Scientific Choice II: The Two Cultures“, *Minerva* 3 (toamna anului 1964): 3–14.
- 58 un articol de-al meu pe această temă:** S. Weinberg, „Newtonianism“.
- 59 Gleick e cel care a făcut accesibilă fizica haosului publicului larg:** J. Gleick, *Chaos: Making a New Science* (New York: Viking, 1987).
- 59 Într-o conferință recentă, el susținea:** Discursul de încheiere al lui James Gleick la Conferința Nobel din 1990 de la Colegiul Gustavus Adolphus, octombrie 1990.

CAPITOLUL IV

- 68 câte un număr pentru fiecare punct din spațiu prin care trece unda:** Desigur, există un număr infinit de puncte în orice volum din spațiu și în realitate nu poți da lista completă a numerelor ce reprezintă o undă. Dar, pentru a înlesni vizualizarea (și de multe ori în calculele numerice), ne putem închipui că spațiul constă dintr-un număr foarte mare, dar finit de puncte, întinzându-se într-un volum foarte mare, dar finit.
- 68 Unda electronului putea fi și ea descrisă în orice moment printr-o listă de numere:** Acestea sunt de fapt numere complexe, în sensul că ele implică în general cantitatea notată prin litera i , egală cu rădăcina pătrată a lui minus unu, precum și numere obișnuite, atât pozitive, cât și negative. Partea oricărui număr complex proporțională cu i se numește partea sa imaginară; restul se numește partea sa reală. Voi evita aici această complicație deoarece, oricât de importantă ar fi, nu afectează cu adevărat ceea ce vreau să spun în legătură cu mecanica cuantică.
- 68 când un asemenea pachet de unde lovește un atom, el se destramă:** De fapt, pachetul de unde al electronului începe să se destrame încă înainte ca electronul să ciocnească atomul. În cele din urmă s-a înțeles că aceasta

se datorează faptului că, în conformitate cu interpretarea probabilistică a mecanicii cuantice, pachetul de unde nu reprezintă un electron cu o viteză bine precizată, ci cu o distribuție de diferite viteze posibile.

70 o undă a electronului care ia forma unei alternări domoale de creste și văi aflate la distanțe egale și întinzându-se pe mai multe lungimi de undă reprezintă un electron care are un impuls destul de bine definit: Această prezentare ar putea lăsa impresia greșită că într-o stare cu impuls definit există o alternare între punctele în care electronul este improbabil să se afle, unde valorile corespunzătoare ale funcției de undă sunt minime, și punctele în care electronul este cel mai probabil să se afle, unde valorile funcției de undă sunt maxime. Acest lucru nu e adevărat din cauza faptului că funcția de undă e complexă, după cum am menționat într-o notă anterioară. Există de fapt două părți ale fiecărei valori a funcției de undă, numite parte reală și parte imaginară, defazate între ele: când una e mică, cealaltă e mare. Probabilitatea ca un electron să se afle într-o anumită regiune mică e proporțională cu suma pătratelor celor două părți ale valorii funcției de undă pentru acea poziție, iar această sumă este strict constantă pentru o stare cu impuls bine definit.

70 pe care a numit-o complementaritate: N. Bohr, *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como, Settembre 1927*, retipărit în *Nature* 121 (1928): 78, 580.

71 probabilități date de pătratele valorilor funcției de undă: Mai exact, suma pătratelor părților reală și imaginară ale valorilor funcției de undă este cea care dă probabilitățile diferitelor configurații.

71 Putem privi acest sistem ca pe o particulă imaginară având doar două poziții: Desigur, particulele din lumea reală nu sunt limitate doar la două poziții, dar există sisteme fizice care pentru scopuri practice pot fi privite ca sisteme cu două configurații. Spinul unui electron e un exemplu din lumea reală pentru un asemenea sistem cu două stări. (Spinul sau momentul cinetic intrinsec al unui sistem e o mărime care depinde de viteza de rotație, de masa sistemului și de distanța care separă masa de axa de rotație. Se consideră că are o direcție orientată de-a lungul axei de rotație.) În mecanica clasică, spinul unui giroscop sau al unei planete poate avea orice mărime și orice direcție. Dimpotrivă, în mecanica cuantică, dacă măsurăm valoarea spinului unui electron în jurul unei direcții oarecare, de exemplu nord (de regulă prin măsurarea energiei interacției sale cu un câmp magnetic în acea direcție), putem obține doar unul din două rezultate: electronul se rotește fie în sensul acelor de ceasornic, fie în sens contrar, dar mărimea spinului rămâne mereu aceeași: mărimea spinului electronului în jurul oricărei direcții este egală cu constanta lui Planck împărțită la 4, sau aproximativ cu o sutime de milionime de milionime de milionime de milionime de

milionime de milionime de milionime de milionime de milionime din spinul Pământului în jurul axei sale.

- 72 probabilitatea ca rezultatul să fie aici este dată de pătratul valorii aici [...] iar probabilitatea ca ea să fie acolo este dată de pătratul valorii acolo:** Suma acestor două probabilități trebuie să fie unu (adică 100%), astfel că suma pătratelor valorilor *aici* și *acolo* trebuie să fie egală cu unu. Aceasta sugerează o reprezentare geometrică foarte utilă. Desenați un triunghi dreptunghic cu o latură orizontală de lungime egală cu valoarea *aici* a funcției de undă și o latură verticală având lungimea egală cu valoarea *acolo*. (Desigur, prin orizontal și vertical mă refer la oricare două direcții perpendiculare. Aș fi putut spune la fel de bine de-a lungul și de-a latul.) Nu trebuie să fiți un general-maior din zilele noastre pentru a ști un lucru banal despre pătratul ipotenuzei acestui triunghi: el este egal cu suma pătratelor laturilor verticală și orizontală. Dar, după cum am văzut, această sumă are valoarea unu, deci ipotenuza are lungimea unu. (Prin unu nu înțeleg un metru sau un picior, deoarece probabilitățile nu se măsoară în metri pătrați sau picioare pătrate; înțeleg pur și simplu numărul unu.) Invers, dacă avem o săgeată de lungime unu cu o direcție dată în două dimensiuni (cu alte cuvinte, un vector unitate bidimensional), atunci din proiecția sa pe direcțiile orizontală și verticală, sau oricare alte două direcții perpendiculare, rezultă o pereche de numere ale căror pătrate însumate dau în mod necesar unu. Astfel, în loc să specificăm o valoare *aici* și o valoare *acolo*, starea ar putea fi la fel de bine reprezentată de o săgeată (ipotenuza triunghiului nostru) de lungime egală cu unu, a cărei proiecție pe oricare direcție este valoarea funcției de undă pentru configurația sistemului corespunzătoare acelei direcții. Această săgeată se numește *vector de stare*. Dirac a elaborat o formulare oarecum abstractă a mecanicii cuantice folosind vectorii de stare, care prezintă avantaje în raport cu formularea prin funcții de undă, deoarece putem vorbi despre un vector de stare fără să ne referim la o configurație anume a sistemului.
- 72 asupra naturii sistemului în cauză:** Desigur, majoritatea sistemelor dinamice sunt mai complicate decât particula noastră imaginară. De pildă, să considerăm două asemenea particule. Există aici patru configurații posibile, în care particulele unu și doi se află respectiv în stările *aici* și *aici*, *aici* și *acolo*, *acolo* și *aici*, *acolo* și *acolo*. Astfel, funcția de undă pentru starea a două particule are patru valori și e nevoie de șaisprezece constante pentru a descrie cum evoluează în timp. Remarcați că există în continuare o singură funcție de undă care descrie starea comună a celor două particule. În general așa se întâmplă; nu avem o funcție de undă separată pentru fiecare electron sau altă particulă, ci o singură funcție de undă pentru orice sistem, oricât de multe particule ar conține.

- 73 există o pereche de stări [...] de impuls bine definit, pe care le putem numi *stop* și *start*:** Când spun că aceste stări au impuls bine definit nu sunt prea riguros. Cu numai două poziții posibile, starea *start* este cât se poate de apropiată de o undă netedă cu o creastă *aici* și o vale *acolo*, corespunzând unei particule cu un impuls diferit de zero, în timp ce starea *stop* e ca o undă plată, pentru care lungimea de undă e mult mai mare decât distanța de *aici* până *acolo*, corespunzând unei particule în repaus. Aceasta e o versiune primitivă a ceea ce matematicienii numesc analiză Fourier. (Riguros vorbind, trebuie să considerăm valorile *stop* și *start* ale funcției de undă ca suma sau diferența valorilor *aici* și *acolo* împărțite la rădăcina pătrată a lui doi, pentru a satisface condiția menționată într-o notă anterioară, și anume că suma pătratelor celor două valori trebuie să fie egală cu unu.)
- 73 autori precum Fritjof Capra:** F. Capra, *The Tao of Physics* (Boston: Shambhala, 1991).
- 74 prea simple pentru a admite soluții haotice:** Fizicienii folosesc uneori termenul „haos cuantic” pentru a se referi la proprietățile sistemelor cuantice care *ar fi* haotice în fizica clasică; dar sistemele cuantice înseși nu sunt niciodată haotice.
- 76 fizicienii experimentatori au demonstrat:** În special Alain Aspect.
- 78 fiecare dintre aceste istorii se va desfășura de acum înainte fără a interacționa cu cealaltă:** Fenomenul prin care cele două istorii ale lumii încetează să interfere se numește „decoerență”. Studiul modului în care se realizează aceasta a atras în ultima vreme atenția mai multor teoreticieni, între care Murray Gell-Mann și James Hartle și, independent de ei, Bryce De Witt.
- 79 Numeroși fizicieni au încercat să epureze bazele mecanicii cuantice de orice afirmație privind probabilitățile:** Iată o listă parțială de referințe: J.B. Hartle, „Quantum Mechanics of Individual Systems”, *American Journal of Physics* (1968): 704; B.S. De Witt și N. Graham, în *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton University Press, 1973), pp. 183–186; D. Deutsch, „Probability in Physics”, Oxford University Mathematical Institute preprint, 1989; Y. Aharonov, articol în pregătire.
- 83 nelinearitățile teoriei generale ar putea fi folosite pentru a transmite instantaneu semnale:** Polchinski a găsit mai târziu o interpretare ușor modificată a acestei teorii, în care o asemenea comunicare cu viteză mai mare decât viteza luminii e interzisă, dar „lumile diferite” corespunzând diferitelor rezultate ale măsurătorilor pot continua să comunice între ele.

CAPITOLUL V

- 85 orbitele eliptice [...] au o mișcare de precesie:** Adică orbitele nu se închid exact; o planetă care pornește din punctul cel mai apropiat de Soare, numit periheliu, spre punctul cel mai îndepărtat de Soare și apoi se întoarce în punctul cel mai apropiat de Soare parcurge ceva mai mult de 360 de grade în jurul Soarelui. Ușoara modificare a orientării orbitei ce rezultă de aici se numește de regulă precesia periheliului.
- 88 Într-un raport adresat în 1921 comitetului Nobel:** Informația citată aici în legătură cu rapoartele și nominalizările pentru Premiul Nobel sunt extrase din superba biografie științifică scrisă de A. Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein* (New York: Oxford University Press, 1982), capitolul 30.
- 89 Într-adevăr, astronomii expediției din 1919 au fost acuzați:** Pentru o prezentare amplă și referințe, vezi D.G. Mayo, „Novel Evidence and Severe Tests“, *Philosophy of Science* 58 (1991): 523.
- 89 în cazul relativității generale, o retrodicție [...] a oferit teoriei un test mai concludent decât o adevărată predicție:** Am făcut această remarcă în cursurile ținute la Universitatea Columbia în 1984. M-am bucurat să constat mai târziu că la aceeași concluzie a ajuns independent și un reputat istoric al științei, Stephen Brush, în „Prediction and Theory Evaluation: The Case of Light Bending“, *Science* 246 (1989): 1124.
- 90 am văzut că primele dovezi experimentale în favoarea relativității generale:** Ar trebui să menționez că Einstein propusese un al treilea test al relativității generale bazat pe predicția deplasării spre roșu a luminii în câmp gravitațional. Așa cum un proiectil lansat de la suprafața Pământului pierde din viteză pe măsură ce se ridică în câmpul gravitațional al Pământului, la fel și o rază de lumină emisă de pe suprafața unei stele sau planete pierde energie pe măsură ce înaintează în spațiu. Pentru lumină, această pierdere de energie se manifestă ca o creștere a lungimii de undă și, prin urmare, pentru lumina vizibilă, o deplasare spre capătul roșu al spectrului. Această creștere minusculă a lungimii de undă are o valoare prezisă de relativitatea generală de 2,12 părți la un milion pentru lumina de la suprafața Soarelui. S-a propus examinarea spectrului luminii solare pentru a vedea dacă liniile spectrale sunt deplasate spre roșu cu această cantitate față de lungimea lor de undă normală. Acest efect a fost căutat de astronomi, dar nu a fost găsit de la început, lucru care se pare că i-a îngrijorat pe unii fizicieni. Raportul comisiei Nobel din 1917 a remarcat că măsurătorile lui C.E. St. John de la Mount Wilson nu au găsit deplasarea spre roșu și a tras următoarea concluzie: „S-ar părea că teoria relativității a lui Einstein, oricare ar fi meritele ei în alte privințe, nu merită un Premiu Nobel.“ Raportul comisiei Nobel din 1919

menționa din nou deplasarea spre roșu drept motiv de rezerve față de relativitatea generală. Oricum, la acea vreme cei mai mulți fizicieni (și Einstein însuși) nu păreau foarte preocupați de problema deplasării spre roșu. Astăzi ne dăm seama că tehnicile folosite în anii '20 nu puteau conduce la o măsurătoare precisă a deplasării gravitaționale spre roșu a luminii solare. De exemplu, deplasarea gravitațională spre roșu prezisă, de două părți la un milion, putea fi mascată de o deplasare produsă de convecția gazelor de la suprafața Soarelui ce emit lumina (cunoscutul efect Doppler), care nu are nimic de a face cu relativitatea generală. Dacă aceste gaze s-ar îndrepta spre observator cu o viteză de 600 de metri pe secundă (viteză perfect plauzibilă), deplasarea gravitațională spre roșu ar fi complet anulată. Abia în ultimii ani studii atente ale luminii de la extremitatea discului solar (unde convecția ar avea loc în principal pe direcție perpendiculară față de direcția de observare) au indicat o deplasare gravitațională spre roșu având aproximativ valoarea așteptată. Primele măsurători precise ale deplasării gravitaționale spre roșu nu au folosit lumina Soarelui, ci raze gama (lumină cu lungime de undă foarte mică) care au fost lăsate să se ridice sau să coboare pe o distanță de doar 22,6 metri în turnul Laboratorului de Fizică Jefferson de la Harvard. Un experiment din 1960 al lui R.V. Pound și G.A. Rebka a găsit o modificare a lungimii de undă a razelor gama în acord cu relativitatea generală, cu marjă de eroare de 10%, precizie îmbunătățită câțiva ani mai târziu până la aproximativ 1%.

90 noile tehnici din domeniul radarului și radioastronomiei au dus la o îmbunătățire substanțială a preciziei testării experimentale: În special în cercetările lui Irwin Shapiro, pe atunci la MIT.

91 mișcării particulelor mici în fluide: Aceasta e mișcarea browniană. Este rezultatul ciocnirii dintre moleculele de lichid și particule. Cu ajutorul teoriei lui Einstein privind mișcarea browniană, observațiile asupra acestei mișcări au putut fi folosite la calculul unor proprietăți ale moleculelor și au constituit pentru chimiști și fizicieni o dovadă că moleculele erau reale.

91 Einstein a încercat cel puțin una dintre ele: Pentru specialiști, mă refer aici la teoria scalară cu masă nulă.

93 nu există nici un sistem de referință în cădere liberă: De exemplu, să presupunem că adoptăm un sistem de referință care în orice punct din spațiu are o accelerație de 32 picioare pe secundă, paralelă cu direcția Texas–centrul Pământului. În acest sistem de referință, noi în Texas nu vom simți câmpul gravitațional, fiindcă în Texas acest sistem de referință e un sistem în cădere liberă, dar prietenii noștri din Australia vor simți un câmp gravitațional de două ori mai intens decât cel normal, deoarece în Australia acest sistem de referință accelerează dinspre centrul Pământului, nu înspre el.

- 97 în teoria lui Newton se poate înlocui legea inversului pătratului cu o lege a inversului cubului sau a inversului puterii 2,01, fără nici cea mai mică modificare în cadrul conceptual al teoriei:** Acest lucru e adevărat pentru formularea teoriei lui Newton prin forțe ce acționează la distanță, dar nu și pentru reformularea ulterioară (dată de Laplace și alții) ca teorie de câmp. Dar chiar și în această din urmă versiune e simplu de adăugat un nou termen la ecuațiile de câmp, care să producă alte modificări în dependența forței de distanță. Mai exact, legea inversului pătratului ar putea fi înlocuită cu o formulă care să dea pentru forța gravitațională o comportare aproximativă de tipul inversului pătratului până la o anumită distanță, după care forța să scadă exponențial. O asemenea modificare nu e posibilă în relativitatea generală.
- 98 energia și impulsul câmpurilor electric și magnetic dintr-o rază de lumină apar în pachete:** Born, Heisenberg și Jordan au considerat de fapt numai o versiune simplificată a unui câmp electromagnetic, în care complicațiile legate de polarizarea luminii sunt ignorate. Aceste complicații au fost luate în calcul ceva mai târziu de către Dirac, iar apoi o tratare completă a teoriei cuantice de câmp a electromagnetismului a fost dată de Enrico Fermi.
- 99 poate fi calculată însumând un număr infinit de contribuții:** Energiile permise ale fotonilor formează un continuum, deci această „sumă“ este de fapt o integrală.
- 101 În cele din urmă, rezolvarea problemei infiniților a apărut la sfârșitul anilor '40:** Istoria acestor descoperiri poate fi găsită în articolul lui T.Y. Cao și S.S. Schweber „The Conceptual Foundations and Philosophical Aspects of Renormation Theory“, care va apărea în *Synthese* (1992).
- 101 Lamb tocmai reușise să măsoare:** Mai precis, Lamb măsurase diferența în deplasarea energiei pentru două stări ale atomului de hidrogen, care, conform cu vechea teorie a lui Dirac, ar fi trebuit să aibă exact aceeași energie în absența emisiilor și reabsorbțiilor de fotoni. Deși Lamb nu a putut măsura exact energiile celor două stări atomice, el a observat că acestea diferă printr-o cantitate infimă, demonstrând astfel că ceva deplasase energiile celor două stări cu cantități diferite.
- 102 E posibil ca acești doi infiniți să se anuleze și să rezulte o energie totală finită?:** Această idee fusese sugerată înainte de Dirac, Weisskopf și H.A. Kramers.
- 103 calcule și mai exacte ale deplasării Lamb:** Aceste calcule au fost făcute de Lamb însuși împreună cu Norman Kroll și de Weisskopf împreună cu Tony French.
- 103 După cum spunea Nietzsche:** Din „Aus dem Nachlass der Achtzigerjahre“, jurnal din anii 1880 publicat postum în F. Nietzsche, *Werke III*, Schlecta, ediția a șasea (München: Carl Hauser, 1969), p. 603. Această

remarcă e tema unui roman, *Death of a Beekeeper* (New York: New Directions, 1981), al colegului meu de la Universitatea din Texas Lars Gustafsson.

- 104 acest calcul a fost continuu îmbunătățit:** Aceste rezultate teoretice și experimentale sunt prezentate de T. Kinoshita în *Quantum Electrodynamics*, ed. T. Kinoshita (Singapore: World Scientific, 1990).
- 105 Nu mi s-a părut că e înspăimântător un infinit în masa și sarcina goală:** Există o problemă mai gravă a electrodinamicii cuantice. În 1954, Murray Gell-Mann și Francis Low au arătat că sarcina efectivă a electronului crește foarte lent odată cu energia procesului în care este măsurată și s-au întrebat (așa cum o făcuse mai devreme și fizicianul sovietic Lev Landau) dacă sarcina efectivă nu devine de fapt infinită la o energie foarte mare. Calcule mai recente au arătat că acest dezastru se petrece într-adevăr în electrodinamica cuantică pură, teorie care nu conține decât fotoni și electroni. Energia la care apare acest infinit este însă atât de mare (mult mai mare decât cea conținută în masa totală a universului observabil), încât cu mult înainte de a atinge asemenea energii devine imposibil să ignori toate celelalte tipuri de particule din natură în afara fotonilor și electronilor. În măsura în care există încă o problemă legată de coerența matematică a electrodinamicii cuantice, ea este aceeași cu problema coerenței teoriilor noastre cuantice despre toate particulele și forțele.
- 107 teoria lui Fermi asupra forței nucleare slabe a căpătat forma finală:** Prin cercetările lui Feynman și Gell-Mann și, independent de ei, Robert Marshak și George Sudarshan.
- 107 o analogie cu electrodinamica cuantică:** Mă refer aici la generalizarea electrodinamicii cuantice datorată lui C.N. Yang și R.L. Mills.
- 110 În 1967, zero citări:** Lucrul nu e strict adevărat, fiindcă eu am menționat articolul într-o luare de cuvânt la Conferința Solvay de la Bruxelles în 1967. ISI nu ia însă în considerare decât articolele publicate în reviste, iar remarcă mea a fost publicată în lucrările conferinței.
- 110 cel mai frecvent citat articol:** Eugene Garfield, „The Most-Cited Papers of All Time, SCI 1945-1988“, în *Current Contents*, 12 februarie 1990, p. 3. Pentru a fi mai exact, acesta a fost singurul articol din domeniul fizicii particulelor elementare (sau din orice altă ramură a fizicii cu excepția biofizicii, chimiei fizice și cristalografiei) din cele o sută de articole din toate științele care au fost cel mai frecvent citate în perioada luată în considerare de studiul ISI, 1945–1988. (Din cauza războiului, probabil că nu au existat articole frecvent citate în fizica particulelor elementare în anii 1938–1945.)
- 115 fizicienii de la Oxford și Seattle și-au repetat experimentele:** S-a întâmplat să mă aflu la Oxford în urmă cu câțiva ani și am folosit acest

prilej pentru a-l întreba pe Pat Sanders, cel care condusese experimentul cu bismut de la Oxford, dacă echipa sa și-a dat seama ce nu fusese în regulă la primul experiment. Mi-a răspuns că nu și că, din păcate, nu vor afla niciodată, fiindcă experimentatorii de la Oxford dezmembraseră instalația și foloseau părți ale ei într-o nouă instalație, care acum obțineva răspunsul corect. Asta e situația.

116 am prezis [...] un nou tip de particulă: Am făcut-o pe baza unui principiu de simetrie propus de Roberto Peccei și Helen Quinn.

116 Ideea fie e incorectă, fie trebuie modificată: Asemenea modificări au fost propuse de M. Dine, W. Fischler, M. Srednicki și Y. Kim.

117 descoperirea radiației cosmice de fond: Descoperirea a fost făcută de Arno Penzias și Robert Wilson. Am scris despre descoperirea radiației cosmice de fond în *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (New York: Basic Books, 1977).

118 istoricii militari scriu adesea ca și cum generalii ar pierde bătălii pentru că nu urmează niște reguli bine stabilite ale științei militare: Un exemplu este Basil Liddell Hart, care pledează pentru „abordarea indirectă“.

118 Aceasta este arta războiului: Trebuie să recunosc că în expresia „arta războiului“, așa cum apare ea în traduceriile lucrărilor clasice ale lui Sun Tzu, Jomini și Clausewitz, cuvântul „artă“ e folosit în opoziție cu „știință“ la fel cum „tehnica“ e opusă „cunoașterii“, dar nu în sensul în care „subiectivul“ se opune „obiectivului“ sau „inspirația“ se opune „metodei“. Acești autori folosesc termenul „artă“ ca să sublinieze că scriau despre arta războiului fiindcă doreau să ajute la câștigarea războaielor, dar voiau s-o facă într-un mod științific și sistematic. Generalul confederat James Longstreet a folosit expresia „arta războiului“ cam în același sens în care o fac și eu aici atunci când a spus că McClellan și Lee au fost amândoi „maestri în știință, dar nu și în arta războiului“ (James Longstreet, *From Manassas to Appomattox* [Philadelphia: Lippincott, 1896], p. 288). Mai târziu, istorici precum Charles Oman și Cyril Falls, care au scris despre o „artă a războiului“, au spus limpede că nu există un sistem al războiului. Cititorii care m-au urmărit cu atenție vor înțelege că nu există nici un sistem al științei.

CAPITOLUL VI

119 căutarea frumuseții în fizică: Astrofizicianul Subrahmanyam Chandrasekhar a scris pagini emoționante despre rolul frumuseții în știință în *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivation in Science* (Chicago: University of Chicago Press, 1988) și *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences* 43, nr. 3 (decembrie 1989): 14.

- 121 în teoria lui Einstein sunt paisprezece:** Mă refer la cele zece ecuații de câmp plus cele patru ecuații de mișcare.
- 121 Einstein spunea despre relativitatea generală:** Citat de G. Holton, „Constructing a Theory: Einstein's Model“, *American Scholar* 48 (vara lui 1979): 323.
- 127 pachete numite gravitoni, care de asemenea se comportă ca particule cu masă nulă:** Gravitonii nu au fost detectați experimental, dar acest lucru nu trebuie să ne surprindă; calculele arată că ei interacționează atât de slab, încât gravitonii individuali nu puteau fi detectați în nici un experiment efectuat până în prezent. Nu există însă nici un motiv serios să ne îndoim de existența gravitonilor.
- 130 familiile acestor alte tipuri de particule:** Riguros vorbind, numai stările cu spin spre stânga ale electronilor, neutrinilor și cuarcilor „up“ și „down“ sunt cele care formează aceste familii. (Prin spin spre stânga înțeleg că particula se rotește în direcția indicată de degete dacă degetul mare al mâinii stângi este de-a lungul axei de rotație a particulei, îndreptat în sensul de mișcare al particulei.) Această distincție între familiile formate de stările cu spin spre stânga și cele cu spin spre dreapta stă la originea faptului că forțele nucleare slabe nu respectă simetria dintre dreapta și stânga. (Asimetria dreapta–stânga a forțelor slabe a fost propusă în 1956 de teoreticienii T.D. Lee și C.N. Yang. Ea a fost verificată experimental la dezintegrarea nucleară beta de către C.S. Wu, în colaborare cu un grup de la Biroul Național de Standarde din Washington, și la dezintegrarea mezonului π de către R.L. Garwin, L. Lederman, M. Weinrich, J. Friedman și V. Telegdi.) Încă nu știm de ce numai electronii, neutrinii și cuarcii cu spinul spre stânga formează aceste familii; aceasta rămâne o provocare pentru teoriile care își propun să ajungă dincolo de modelul standard al particulelor elementare.
- 130 din motive pur istorice:** În 1918, matematicianul Hermann Weyl a lansat ideea că la simetria relativității generale în raport cu transformările depinzând de spațiu-timp ale poziției și orientării trebuie să se adauge o simetrie în raport cu transformările depinzând de spațiu-timp a felului în care măsurăm (sau „etalonăm“) distanțele și duratele. Acest principiu de simetrie a fost curând abandonat de fizicieni (deși versiuni ale sale mai apar uneori în teorii speculative), dar e foarte asemănător matematic cu o simetrie internă a ecuațiilor electrodinamicii, care a ajuns astfel să se numească invarianța la etalonare. Apoi, când un tip mai complicat de simetrie internă locală a fost introdus în 1954 de C.N. Yang și R.L. Mills (în încercarea de a explica forța nucleară tare), și acesta a fost numit simetrie de etalonare.

- 131 proprietatea internă a cuarcilor numită culoare:** Diferite versiuni ale atributului cuarcilor numit culoare au fost sugerate de O.W. Greenberg; M.Y. Han și Y. Nambu; W.A. Bardeen, H. Fritzsch și M. Gell-Mann.
- 132 teoria trebuie să fie „renormabilă“:** Vezi observațiile din capitolul 8 care explică această cerință.
- 135 procese ca dezintegrarea nucleară beta, care nu puteau fi înțelese în teoria lui Dirac:** În teoria lui Dirac, electronii sunt eterni; un proces cum e producerea unui electron și a unui pozitron este interpretat ca urcarea unui electron dintr-o stare de energie negativă într-o stare de energie pozitivă, lăsând în marea electronilor cu energii negative un gol care e observat ca pozitron, iar anihilarea unui electron și a unui pozitron e interpretată drept căderea unui electron într-un astfel de gol. În dezintegrarea nucleară beta sunt creați electroni din energia și sarcina electrică a câmpului electronic, *fără a fi creați și pozitroni*.
- 136 există alte particule cu alți spini:** Dirac și cu mine am fost la o conferință în Florida la începutul anilor '70, iar eu am profitat de ocazie pentru a-l întreba cum își explică faptul că există particule (de pildă mezonul π sau particula W) care au un spin diferit de al electronului și nu pot avea stări stabile de energie negativă, dar au antiparticule distincte. Dirac a spus că nu se gândise niciodată că aceste particule erau importante.
- 136 O posibilă explicație a fost dată de Niels Bohr:** Aceasta este o amintire a lui Heisenberg, citată de Valentine Telegdi și Victor Weisskopf într-un articol despre operele complete ale lui Heisenberg din *Physics Today*, iulie 1991, p. 58. Aceeași idee privind diversitatea limitată a formelor matematice posibile a fost exprimată și de matematicianul Andrew Gleason.
- 136 Matematicianul englez G.H. Hardy:** Hardy s-a mândrit mereu cu faptul că lucrările sale de matematică pură nu pot avea nici un fel de aplicație practică. Totuși, pe vremea când Kerson Huang și cu mine studiam la MIT comportamentul materiei la temperaturi extrem de ridicate, am găsit exact formulele matematice de care aveam nevoie în articolele lui Hardy și Ramanujan despre teoria numerelor.
- 137 Carl Friedrich Gauss și alții au elaborat o geometrie neeuclidiană:** Ceilalți principali arhitecți ai acestui spațiu curb au fost Janos Bolyai și Nikolai Ivanovici Lobacevski. Opera lui Gauss, Bolyai și Lobacevski a fost importantă pentru viitorul matematicii fiindcă la ei acest spațiu nu e curb doar așa cum ne apare curbă suprafața Pământului, privită dintr-un spațiu necurbat cu mai multe dimensiuni care o înglobează, ci e descris prin curbura lui intrinsecă, fără vreo referire la felul în care e înglobată într-un spațiu cu mai multe dimensiuni.

- 137 toate postulatele lui Euclid cu excepția celui de-al cincilea:** Una din versiunile celui de-al cincilea postulat al lui Euclid afirmă că printr-un punct exterior unei drepte putem trasa o singură dreaptă paralelă cu aceasta. În geometria neeuclidiană a lui Gauss, Bolyai și Lobacevski pot fi trasate mai multe asemenea drepte paralele.
- 138 descoperirea experimentală din 1936 că forța nucleară:** Experimentele respective au fost efectuate de Merle Tuve împreună cu N. Heydenberg și R.L. Hafstad, folosind un accelerator Van de Graff de un milion de volți pentru a bombarda cu un fascicul de protoni o țintă bogată în protoni cum e parafina.
- 138 Aceste transformări de simetrie acționează [...] într-un mod care, matematic, este același cu modul în care rotațiile obișnuite din trei dimensiuni acționează asupra spinilor particulelor:** Din acest motiv simetria aceasta poartă numele de *simetrie de spin izotopic*. (Ea a fost propusă în 1936 de G. Breit și E. Feenberg, și independent de B. Cassen și E.U. Condon, pe baza experimentelor lui Tuve.) Simetria de spin izotopic e de asemenea matematic asemănătoare cu simetria internă care stă la baza forțelor slabă și electromagnetică în teoria electroslabă, dar din punct de vedere fizic se deosebește mult. O deosebire este aceea că particule diferite se grupează în familii: protonul și neutronul pentru simetria de spin izotopic, iar electronul și neutrinul cu spinul spre stânga, precum și cuarcii „up” și „down” cu spinul spre stânga pentru simetria electroslabă. De asemenea, simetria electroslabă afirmă că legile naturii sunt invariante la transformări care pot depinde de poziția în spațiu și timp; ecuațiile care guvernează fizica nucleară își păstrează forma numai dacă transformăm protonii și neutronii unii într-alții în același mod pretutindeni și în orice moment. În fine, simetria de spin izotopic e doar aproximativă și e percepută în prezent ca o consecință oarecum accidentală a maselor mici ale cuarcilor din teoria modernă a forțelor nucleare tari; simetria electroslabă e exactă și e considerată un principiu fundamental în teoria electroslabă.
- 139 o structură matematică numită grup:** Dacă două transformări lasă un lucru neschimbat, atunci la fel face și „produsul” lor, definit prin efectuarea unei transformări și apoi a celeilalte. Dacă o transformare lasă un lucru neschimbat, atunci la fel face și inversa ei, transformarea care anulează efectul primeia. De asemenea, există mereu o transformare care lasă orice lucru neschimbat, transformarea care nu face absolut nimic, numită transformarea unitate deoarece acționează la fel ca înmulțirea cu numărul unu. Acestea sunt cele trei proprietăți care fac dintr-un set de operații un grup.
- 139 o listă a tuturor grupurilor Lie „simple”:** Pe scurt, există trei categorii infinite de grupuri Lie simple: grupurile rotațiilor obișnuite în două, trei

sau mai multe dimensiuni și alte două categorii de transformări oarecum asemănătoare rotațiilor, numite transformări unitare și simplectice. În plus, există cinci grupuri Lie „excepționale” care nu aparțin nici uneia din aceste categorii.

- 140 descoperirea în 1964 la Brookhaven a acestei particule anticipate:** De un grup condus de N. Samios.
- 140 nu există formule generale pentru soluțiile anumitor ecuații algebrice:** Grupul studiat de Gaulois era mulțimea permutărilor soluțiilor ecuațiilor.
- 140 Într-un bine cunoscut eseu, fizicianul Eugene Wigner:** E.P. Wigner, „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics”, *Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 (1960): 1–14.
- 142 Abia după apariția unui stil matematic riguros și abstract:** J.L. Richards, „Rigor and Clarity: Foundations of Mathematics in France and England, 1800–1840”, *Science in Context* 4 (1991): 297.
- 144 În autobiografia sa, Francis Crick:** F. Crick, *What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery* (New York: Basic Book, 1988).
- 145 alte triplete nu codifică nimic:** Riguros vorbind, tripletele altminteri lipsite de semnificație poartă mesajul „sfârșit de serie”.
- 146 Kepler a spus:** Într-o scrisoare a lui Kepler către Fabricius datată mai 1605, citată de E. Zilsel, „The Genesis of the Concept of Physical Law”, *Philosophical Review* 51 (1942): 245.

CAPITOLUL VII

- 149 Nu vreau să neg orice valoare filozofiei:** Doi prieteni filozofi mi-au făcut observația că titlul acestui capitol, „Împotriva filozofiei”, e o exagerare, fiindcă eu nu pledez împotriva filozofiei în general, ci doar împotriva efectelor negative asupra științei ale unor doctrine filozofice cum sunt pozitivismul și relativismul. Ei au crezut că am ales acest titlu ca răspuns la cartea lui Feyerabend *Împotriva metodei*. În realitate, titlul acestui capitol mi-a fost sugerat de titlurile a două celebre articole apărute în reviste de drept, „Împotriva concesiunii” de Owen Fiss și „Împotriva suprapunerii jurisdicțiilor” de Louise Weinberg. Oricum, nu mi s-a părut că „Împotriva pozitivismului și relativismului” ar fi fost un titlu prea atrăgător.
- 149 „aceste discuții aproape ezoterice”:** G. Gale, „Science and Philosophers”, *Nature* 312 (1984): 491.
- 149 „Mi se pare extrem de improbabil”:** L. Wittgenstein, *Culture and Value*, (Oxford: Blackwell, 1980).
- 149 Unele dintre ele erau scrise într-un jargon atât de impenetrabil:** Vezi, de exemplu, unele articole din *Reduction in Science: Structure, Examples*,

Philosophical Problems, ed. W. Balzer, D.A. Pearce și H.-J. Schmidt, (Dordrecht: Reidel, 1984).

- 150 Dar rareori mi s-a părut că au vreo legătură cu cercetarea științifică:** Mulți alți oameni de știință activi au aceeași reacție la scrierile filozofilor. De pildă, în răspunsul adresat filozofului H. Kinkaid, pe care l-am citat în capitolul 3, biochimistul J.D. Robinson observă că „biologii comit fără îndoială păcate filozofice monstruoase. Și ei ar trebui să primească cu entuziasm interesul doct al filozofilor. Dar acest interes va fi cu adevărat util atunci când filozofii vor înțelege ce urmăresc și ce fac biologii.“
- 150 După Feyerabend:** P.K. Feyerabend, „Explanation, Reduction, and Empiricism“, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 3 (1962): 46–48. Filozofii la care se referă Feyerabend sunt pozitivistii Cercului din Viena, la care ne vom referi mai târziu.
- 151 în Olanda, Italia, Franța și Germania (în această ordine):** A. Rupert Hall, „Making Sense of the Universe“, *Nature* 327 (1987): 669.
- 151 pătrunzătorul roman al lui Russel McCormmach:** R. McCormmach, *Night Thoughts of a Classical Physicist* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1982).
- 154 Andrei Linde și alți cosmologi:** Aceste studii se bazează pe așa-numita cosmologie inflaționară a lui Alan Guth.
- 156 într-o scrisoare adresată acestuia câțiva ani mai târziu:** Citat de J. Bernstein, „Ernst Mach and the Quarks“, *American Scholar* 53 (iarna 1983–1984): 12.
- 156 Primul articol important al lui Heisenberg:** Traducerea este luată din *Sources of Quantum Mechanics*, ed. B.L. van der Waerden (New York: Dover, 1967).
- 156 George Gale învinuiește chiar pozitivismul:** G. Gale, „Science and the Philosophers“.
- 157 Mach îi scria:** E. Mach, *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910): 603; trad. J. Blackmore, *British Journal of the Philosophy of Science* 40 (1989): 524. Există o dispută între istoricii științei, prezentată de Blackmore, în privința posibilității ca Mach să se fi reconciliat filozofic – sau nu – până la urmă cu teoria relativității speciale a lui Einstein, teorie influențată de înseși ideile lui Mach.
- 158 Kaufmann însă era pozitivist:** Prietenul meu Sambursky (pe care l-am citat în capitolul 5) l-a cunoscut în tinerețe pe Kaufmann. El mi-a confirmat impresia despre Kaufmann – era un om rigid, închis în propria lui filozofie.
- 159 observația nu se poate niciodată elibera de teorie:** Acest punct de vedere a fost susținut cu toată convingerea de filozoful Dudley Shapere,

„The Concept of Observation in Science and Philosophy“, *Philosophy of Science* 49 (1982): 485–525.

- 160 Într-o prelegere din 1974, Heisenberg își amintea:** W. Heisenberg, în *Encounters with Einstein, and Other Essays on People, Places and Particles* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983), p. 114.
- 160 Einstein îl considera pe Mach:** J. Bernstein, „Ernst Mach“.
- 161 În cele din urmă, programul a eșuat:** Cred totuși că am tras câteva învățăminte importante din teoria matricii S . Teoria cuantică a câmpului este așa cum este fiindcă e singurul mijloc de a garanta că observabilele teoriei, și în particular matricea S , nu au proprietăți fizice absurde. În 1981 am ținut o conferință la Berkeley și, deoarece știam că Geoffrey Chew urma să asiste, m-am străduit să spun lucruri frumoase despre influența pozitivă a teoriei matricii S . După discuție, Geoff a venit la mine și mi-a mulțumit pentru remarcile făcute, dar mi-a spus că el lucrează acum în teoria cuantică a câmpului.
- 162 anumite tipuri de teorii cuantice de câmp:** Mă refer aici la teoriile de etalonare neabeliene sau Yang-Mills.
- 162 forțele scad la energii înalte:** Acest calcul a folosit metodele matematice introduse în 1954 în contextul electrodinamicii cuantice de Murray Gell-Mann și Francis Low. Dar, în electrodinamica cuantică și în majoritatea celorlalte teorii, forța crește odată cu creșterea energiei.
- 162 experimentele de împrăștiere la energii înalte încă din 1967:** În special experimentele de rupere a neutronilor și protonilor de către electroni de mare energie, efectuate la Stanford de un grup condus de Jerome Friedman, Henry Kendall și Richard Taylor.
- 162 câțiva fizicieni teoreticieni au emis ipoteza:** Gross, Wilczek și cu mine.
- 162 Se crede acum că dacă încerci:** Din câte știu, această idee se datorează lui G. 't Hooft și L. Susskind, care au ajuns la ea în mod independent. H. Fritzsch, M. Gell-Mann și H. Leutwyller lansaseră și ei înainte ideea că e imposibil să eliberezi cuarci individuali.
- 163 perspectiva modernă asupra particulelor elementare:** Pledoaria în favoarea existenței cuarcilor a devenit convingătoare în 1974, când două echipe de fizicieni conduse de Burton Richter și Sam Ting au descoperit o particulă pe care au numit-o ψ și respectiv J . Proprietățile acestei particule au arătat clar că e alcătuită dintr-un nou cuarc greu și anticuarcul lui, cu toate că acești cuarci nu au putut fi produși izolați. (Existența acestui tip de cuarc greu fusese propusă anterior de Sheldon Glashow, John Iliopoulos și Luciano Maiani ca mijloc de a evita anumite dificultăți ale teoriei interacțiilor slabe, iar masa sa fusese estimată teoretic de Mary Gaillard și Ben Lee. Particula J - ψ fusese prezisă de Thomas Appelquist și David Politzer.)

- 163 Filozofii relativişti neagă pretenţia ştiinţei:** Pentru etiologia şi critica relativiştilor, vezi M. Bunge, „A Critical Examination of the New Sociology of Science“, *Philosophy of the Social Sciences* 21 (1991): 524 [Partea I] şi *ibid.*, 22 (1991): 46 [Partea a II-a].
- 163 În celebra sa carte:** T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, ed. a II-a (Chicago: University of Chicago Press, 1970).
- 164 multe dintre observaţiile ei:** S. Traweek, *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1988).
- 165 O carte recentă pe această temă:** D.E. Chubin şi E.J. Hackett, *Peerless Science: Peer Review and U.S. Science Policy* (Albany, N.Y.: State University of New York Press, 1990); citată într-o recenzie a cărţii făcută de Sam Treiman, *Physics Today*, octombrie 1991, p. 115.
- 165 Observarea atentă a felului în care lucrează oamenii de ştiinţă la Institutul Salk:** B. Latour şi S. Woolgar, *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* (Beverly Hills, Calif. şi Londra: Sage Publications, 1979), p. 237.
- 165 titlul unei cărţi a lui Andrew Pickering:** A. Pickering, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics* (Chicago: University of Chicago Press, 1984).
- 166 ca şi cum ar fi doar o schimbare de modă:** Vederi asemănătoare a avut (cu peste douăzeci de ani în urmă) şi Feyerabend, dar între timp s-a răzgândit. Traweek ocoleşte cu grijă acest subiect; ea îşi exprimă înţelegerea faţă de perspectiva fizicienilor conform căreia electronii există, recunoscând că în lucrarea ei i s-a părut nimerit să presupună că fizicienii există.
- 168 atac mai cuprinzător, radical, împotriva ştiinţei înseşi:** Pentru o culegere de articole despre critica îndreptată împotriva ştiinţei, vezi *Science and Its Public: The Changing Relationship*, ed. G. Holton şi W. Blanpied (Boston: Reidel, 1976). Un comentariu mai recent e făcut de G. Holton, „How to Think About the «Anti-science Phenomenon»“, *Public Understanding of Science* 1 (1992): 103.
- 168 Feyerabend a pledat pentru o separare între ştiinţă şi societate:** P. Feyerabend, „Explanation, Reduction, and Empiricism“.
- 168 „nu numai sexistă, ci şi“:** S. Harding, *The Science Question in Feminism* (Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1986), p. 9.
- 168 „Fizica şi chimia, matematica şi logica“:** *Ibid.*, p. 250.
- 168 „sensibilitatea fundamentală a gândirii ştiinţifice“:** T. Roszak, *Where the Wasteland Ends* (Garden City, N.Y.: Doubleday, Anchor Books, 1973), p. 375.
- 168 Nu cunosc nici un om de ştiinţă care să le ia în serios:** Acest fapt e recunoscut de Evelyn Fox Keller în *Reflections on Gender and Science*

(New Haven: Yale University Press, 1985). (Ca exemplu de atitudine a oamenilor de știință, Keller citează o veche remarcă a mea: „Legile naturii sunt la fel de impersonale și de independente de valorile umane ca și regulile aritmeticii. Noi nu am vrut să descoperim asta, dar asta am descoperit.”) Mai recent, răspunzând reinterprețărilor sociologice abuzive ale progresului științific, geneticianul J.S. Jones de la Universitatea din Londra remarcă faptul că „sociologia științei este în aceeași relație cu cercetarea ca și pornografia cu sexul: e mai ieftină, mai simplă și – supunându-se doar imaginației – poate fi mult mai amuzantă” [într-o recenzie a cărții *The Mendelian Revolution: The Emergence of Hereditary Concepts in Modern Science and Society* de Peter J. Bowler, *Nature* 342 (1989): 352].

168 ministrul cercetării științifice din Marea Britanie: Editorial în *Nature* 356 (1992): 729. Ministrul în cauză e George Walden.

168 o carte a lui Bryan Appleyard: B. Appleyard, *Understanding the Present* (Londra: Picador, 1992).

168 Cred că Gerald Holton nu este departe de adevăr: G. Holton, „How to Think About the End of Science” în *The End of Science*, ed. R.Q. Elvee (Lanham, Minn.: University Press of America, 1992).

CAPITOLUL VIII

172 electronii și particulele W și Z au masă, dar neutrinii și fotonii nu au: E posibil ca neutrinii și chiar fotonii să aibă mase atât de mici, încât să fi rămas până acum nedetectate, dar aceste mase ar fi foarte diferite de masele electronilor și particulelor W și Z , lucru la care nu ne-am aștepta dacă simetria între aceste particule ar fi vizibilă în natură.

172 Am putea presupune că simetria dintre cele două tipuri de cuarci ar impune ca masele celor doi cuarci să fie egale, dar aceasta nu e singura posibilitate: De pildă, o ecuație care spune că raportul dintre masele cuarcilor „up” și „down” plus raportul dintre masele cuarcilor „down” și „up” este egal cu 2,5 e evident simetrică pentru cei doi cuarci. Ea are două soluții: într-una din soluții masa cuarcului „up” este dublul masei cuarcului „down”, iar în cealaltă masa cuarcului „down” este dublul masei cuarcului „up”. Ea nu are *nici o* soluție în care masele să fie egale, deoarece în acest caz ambele raporturi ar fi egale cu unu, iar suma lor ar fi egală cu 2, nu cu 2,5.

173 în mod spontan apare în ea un câmp magnetic orientat într-o anumită direcție: Direcția acestui câmp magnetic e determinată de orice câmp magnetic parazit care întâmplător e prezent, de pildă câmpul Pământului; important e că intensitatea magnetismului produs în fier este aceeași, indiferent cât de slab e câmpul parazit. În absența unui câmp

magnetic exterior puternic, direcția magnetismului este diferită în diversele „domenii” din interiorul fierului, iar câmpurile magnetice care apar spontan în domeniile individuale se anulează pentru magnetul luat în ansamblu. Direcțiile magnetismului din diversele domenii pot fi aliniate dacă la răcire fierul e supus unui câmp magnetic exterior puternic, iar magnetizarea va persista și după înlăturarea câmpului magnetic exterior.

174 o simetrie care se întâmplă să fie ruptă în universul nostru. E vorba de simetria între forța slabă și cea electromagnetică: Această simetrie nu e complet ruptă; rămâne o simetrie neruptă (numită invarianța la etalonare electromagnetică) care impune ca fotonul să aibă masă zero. Această simetrie reziduală e ruptă într-un supraconductor. Într-adevăr, asta și e de fapt un supraconductor – în esență, doar o bucată de materie în care invarianța la etalonare electromagnetică e ruptă.

174 Misteriosul neutrino a fost până la urmă descoperit: De către C.L. Cowan și F. Reines.

175 matematica unor exemple mai simple pentru acest tip de rupere de simetrie fusese deja pusă la punct de câțiva teoreticieni: Printre care F. Englert și R. Brout, J.S. Guralnik, C.R. Hagen și T.W.B. Kibble.

177 e posibil ca ruperea simetriei electrolabe să se datoreze efectelor indirecte ale unui nou tip de forță extra-tare: Această nouă forță ar putea face ca produsele câmpurilor oricăror particule ce simt forța să aibă valori de vid care să rupă simetria electrolabă, chiar dacă toate valorile de vid ale câmpurilor individuale sunt zero. (E o trăsătură cunoscută a probabilităților faptul că produsul unor mărimi poate avea în medie o valoare nenulă, chiar dacă media valorilor mărimilor individuale e nulă. De exemplu, înălțimea medie a valurilor deasupra nivelului mării e prin definiție zero, dar *pătratul* înălțimii valurilor – adică produsul înălțimii cu ea însăși – are o valoare medie diferită de zero.) Această nouă forță putea să rămână nedetectată dacă acționează numai asupra unor ipotetice particule care sunt prea grele pentru a fi deocamdată descoperite.

177 Asemenea teorii au apărut la sfârșitul anilor '70: Aceste teorii au fost elaborate independent de Lenny Susskind de la Stanford și de mine. Pentru a distinge noul tip de forță extra-tare necesară în asemenea teorii de forțele tari obișnuite „de culoare”, care leagă cuarcii din interiorul unui proton, noua forță a fost botezată *tehnicoloră*, nume dat de Susskind. Problema cu ideea tehnicoloră este că nu explică masele cuarcilor, electronilor etc. Putem da acestor particule mase și putem evita dezacordul cu experimentele complicând mult teoria, dar ea devine atât de barocă și de artificială, încât e greu s-o luăm în serios.

- 177 interacțiile tari, slabe și electromagnetice să fie unificate:** Teoriile care unifică interacțiunile tari cu cele electroslabă sunt deseori numite teorii ale marii unificări. Asemenea teorii au fost propuse de Jogesh Pati și Abdus Salam, de Howard Georgi și Sheldon Glashow, de H. Georgi, iar apoi de mulți alții.
- 178 În 1974 a apărut o idee:** E vorba de cercetările întreprinse de Howard Georgi, Helen Quinn și de mine.
- 178 o predicție privind tăriile:** Mai exact, doar raportul acestor tării e prezis. În 1974, când a fost făcută această predicție, ea părea la început să fie un eșec; valoarea prezisă a acestui raport era 0,22, dar experimentele de împrăștiere a neutrinilor arătau că valoarea era de aproximativ 0,35. Cu timpul, valoarea experimentală a acestui raport a scăzut, iar în prezent e destul de apropiată de valoarea prezisă. Măsurătorile și calculele teoretice sunt însă acum atât de precise, încât putem vedea că apare o discrepantă de câteva procente. După cum vom vedea, există teorii (încorporând simetria numită supersimetrie) care lămuresc această discrepantă într-un mod cât se poate de firesc.
- 182 ideea unui nou tip de simetrie, numită supersimetrie:** Supersimetria a fost introdusă ca o fascinantă posibilitate de către Julius Wess și Bruno Zumino în 1974, dar speranța că ea va rezolva problema ierarhiei explică în mare măsură interesul de care s-a bucurat. (Versiuni ale supersimetriei apăruseră deja în articole anterioare – ale lui Yu. A. Gol'fand, E.P. Likhtman, D.V. Volkov și V.P. Akulov –, dar aceste articole nu exploraseră semnificația ei fizică și nu au atras prea mult atenția. Wess și Zumino s-au inspirat, cel puțin în parte, din studiile din 1971 asupra teoriei corzilor ale lui P. Ramond, A. Neveu, J.H. Schwarz, J.-L. Gervais și B. Sakita.)
- 182 simetria interzice apariția masei vreunei particule Higgs în ecuațiile fundamentale ale teoriei:** Până la apariția supersimetriei se credea că e imposibil ca o simetrie să interzică asemenea mase. Absența maselor particulelor cum sunt cuarcii, electronul și fotonul, particulele W și Z și gluonii din ecuațiile versiunii inițiale a modelului standard e indisolubil legată de faptul că aceste particule au spin. (Cunoscutul fenomen de polarizare a luminii e un efect direct al spinului fotonului.) Dar, pentru ca un câmp să aibă o valoare de vid nenulă care să rupă simetria electroslabă, câmpul nu trebuie să aibă spin; altminteri, valoarea sa de vid ar rupe și simetria vidului în raport cu schimbarea direcției, ceea ce contrazice flagrant experiența. Supersimetria rezolvă această problemă stabilind o relație între un câmp fără spin a cărui valoare de vid rupe simetria electroslabă și diferitele câmpuri cu spin, în ale căror ecuații de câmp simetria electroslabă interzice să apară vreo masă. Teoriile supersimetrice sunt confruntate cu propriile lor dificultăți: superpartenerii

particulelor cunoscute nu au fost încă descoperiți, deci ei trebuie să fie mult mai grei, iar astfel supersimetria însăși trebuie să fie o simetrie ruptă. Există diferite propuneri interesante pentru mecanismul care rupe supersimetria, unele dintre ele implicând forța gravitațională, dar problema rămâne deocamdată deschisă.

182 Într-o altă abordare [...] pe seama efectelor unei noi forțe extra-tari:

O versiune a modelului standard bazată pe introducerea noilor forțe extra-tari (tehnicolore) ar evita problema ierarhiei, fiindcă nu ar exista nici o masă în ecuațiile care descriu fizica la energii mult mai joase decât energia Planck. Valorile maselor particulelor W și Z și ale celorlalte particule elementare din modelul standard ar fi în schimb legate de modul în care tăria forței tehnicolore variază în funcție de energie. E de așteptat ca forța tehnicoloră și forțele tare și electroslabă să aibă aceeași tărie intrinsecă la o energie foarte înaltă, în apropierea energiei Planck. Tăria ei ar crește foarte încet când energia scade, așa încât forța tehnicoloră nu ar deveni suficient de puternică pentru a rupe vreo simetrie înainte ca energia să scadă la o valoare mult mai mică decât energia Planck. E posibil ca, fără a regla fin constantele teoriei, odată cu scăderea energiei, tăria forței tehnicolore să crească puțin mai repede decât cea a forței de culoare obișnuite, așa încât să dea ceva apropiat de masele observate ale particulelor W și Z din modelul standard, în timp ce, dacă acționează singură, forța de culoare obișnuită le dă mase de o mie de ori mai mici.

182 Din păcate, nu există deocamdată vreun semn al supersimetriei:

Supersimetria impune ca toate particulele cunoscute, cuarci, fotoni și așa mai departe, să aibă „superparteneri“ de spin diferit. Chiar dacă nici unul dintre aceștia nu a fost observat, teoreticienii s-au grăbit să dea nume tuturor superpartenerilor: superpartenerii (cu spin zero) ai particulelor cum sunt cuarcii, electronii și neutrinii sunt numiți scuarci, selectroni, sneutrini și așa mai departe, în timp ce superpartenerii (cu jumătate din spinul) fotonului, particulelor W și Z și gluonilor sunt numiți fotin, win, zin și gluin. Cândva am propus să numim acest dialect „languino“, dar Murray Gell-Mann a propus un termen mai bun: „slanguage“.* Recent, ideea supersimetriei a primit un impuls important prin experimentele de dezintegrare a particulei Z de la laboratorul CERN din Geneva. După cum am menționat mai sus, aceste experimente sunt acum atât de precise, încât putem spune că există o mică discrepantă (de aproximativ 5%) între raportul tăriilor interacțiilor de 0,22 prezis în 1974 și valoarea lui reală. Calculele arată că prezența scuarcilor, gluinilor și tuturor celorlalte noi particule impuse de supersimetrie ar

* Joc de cuvinte: *slang* înseamnă argou, iar *language* limbă, limbaj. (N. red.)

schimba modul în care variază tăriile interacțiilor cu energia exact atât cât trebuie pentru a aduce teoria în acord cu experimentul – ceea ce e un lucru foarte interesant.

185 în radiația solară sunt detectați mai puțini neutrini decât ar fi de așteptat: Acest lucru a fost observat pentru prima dată în 1968, la compararea rezultatelor experimentale ale lui Ray Davis Jr. cu calculele fluxului așteptat de neutrini ale lui John Bahcall.

185 s-ar putea ca unii dintre neutrinii electronici să se fi transformat la trecerea prin Soare în alte tipuri de neutrini: Ipoteza a fost lansată în 1985 de S.P. Mikhaev și A. Yu. Smirnov, pe baza studiilor anterioare ale lui Lincoln Wolfenstein.

CAPITOLUL IX

189 În cursul acestor cercetări, s-a dovedit: Independent de către Yoichiro Nambu, Holger Nielsen și Leonard Susskind.

189 energia lor de vibrație nu are unde să se disipe: Această remarcă îi aparține lui Edward Witten.

189 Primele versiuni ale teoriei corzilor s-au confruntat cu dificultăți: O parte din aceste probleme au putut fi evitate numai prin impunerea simetriei care mai târziu a fost denumită supersimetrie; prin urmare, aceste teorii sunt deseori numite teorii ale supercorzilor.

189 există un mod în care coarda apare ca o particulă cu masă zero și spin dublu față de cel al fotonului: Deși această particulă nedorită apărea în teoriile corzilor ca un mod de vibrație al unei corzi închise, era imposibil de evitat apariția acestei particule luând în considerare numai corzi deschise, fiindcă, atunci când corzile deschise se ciocnesc, ele se unesc inevitabil și formează corzi închise.

190 orice teorie a unei particule având acest spin și această masă trebuie să semene cu relativitatea generală: La această concluzie am ajuns independent Richard Feynman și cu mine.

190 noua particulă de masă nulă [...] era chiar adevăratul graviton: Această ipoteză a fost lansată în 1974 de J. Scherk și J. Schwarz, iar independent de ei de T. Yoneya.

191 „cea mai intensă trăire intelectuală a vieții mele“: Citat de John Horgan în *Scientific American*, noiembrie 1991, p. 48.

191 teoriile corzilor formulate corect par să nu conțină infiniti: Este adevărat că o teorie a corzilor poate fi privită doar ca o teorie a particulelor corespunzând diferitelor moduri de vibrație ale corzii, dar, cum numărul speciilor de particule din orice teorie a corzilor este infinit, teoriile corzilor funcționează diferit față de obișnuitele teorii cuantice

de câmp. De exemplu, într-o teorie cuantică de câmp, emisia și absorbția unei singure specii de particule (cum ar fi fotonul) produce o deplasare de energie infinită; într-o teorie a corzilor corect formulată acest infinit e anulat de efectele emisiei și absorbției unor particule aparținând numărului infinit de alte specii prezente în teorie.

191 testul coerenței matematice pe care teoriile corzilor studiate până atunci nu-l trecuseră: Această incompatibilitate prezentă în anumite teorii ale corzilor fusese descoperită puțin mai devreme de Witten și Louis Alvares-Gaumé.

192 o echipă de teoreticieni: Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger și Edward Witten.

192 „Cvartetul de corzi de la Princeton“: David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec și Ryan Rohn.

192 simetria conformă pare să fie necesară: Simetria conformă se bazează pe faptul că, în deplasarea lor prin spațiu, un set de corzi mătură o suprafață bidimensională din spațiu-timp: fiecare punct de pe suprafață are o coordonată corespunzând timpului și o alta corespunzând poziției de-a lungul uneia dintre corzi. La fel ca pentru orice suprafață, geometria acestei suprafețe bidimensionale măturate de corzi e descrisă prin specificarea distanțelor dintre oricare două puncte foarte apropiate în funcție de coordonatele lor. Principiul invarianței conforme afirmă că ecuațiile care guvernează coarda își păstrează forma dacă schimbăm felul în care măsurăm distanțele înmulțind toate distanțele dintre un punct și orice punct învecinat cu o mărime care poate depinde într-un mod arbitrar de poziția primului punct. Simetria conformă e impusă fiindcă altminteri vibrațiile corzii în direcția timpului ar conduce (în funcție de formularea aleasă pentru teorie) fie la probabilități negative, fie la instabilitatea vidului. Impunând simetria conformă, aceste vibrații de tip temporal pot fi eliminate din teorie printr-o transformare de simetrie, devenind astfel inofensive.

195 principiul antropic: Termenul „principiu antropic“ a fost introdus de Brandon Carter; vezi *Confrontation of Cosmological Theories with Observation*, ed. M.S Longair (Dordrecht: Reidel, 1974). Vezi și B. Carter, „The Anthropic Principle and Its Implications for Biological Evolution“, în *The Constants of Physics*, ed. W. McCrea și M.J. Rees (Londra: Royal Society, 1983), p. 137; reeditat în *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 310 (1983): 347. Pentru o prezentare amănunțită a diferitelor versiuni ale principiului antropic, vezi J.D. Barrow și F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Clarendon Press, 1986); J. Gribbin și M. Rees, *Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology* (New York: Bantam Books, 1989), cap. 10; J. Leslie, *Universes* (Londra: Routledge, 1989).

- 195 Soluția găsită în cele din urmă de Edwin Salpeter:** În articolul său din 1952, Salpeter arată că și E.J. Öpik a avut aceeași idee în 1951.
- 195 experimentatorii care au lucrat împreună cu Hoyle:** D.N.F. Dumbar, W.A. Wensden și W. Whaling.
- 195 nici un obstacol în producerea tuturor elementor mai grele:** De fapt, nivelele energetice ale oxigenului trebuie de asemenea să aibă anumite proprietăți speciale pentru a evita ca tot carbonul să se transforme în oxigen.
- 196 un grup de fizicieni:** M. Livio, D. Hollowell, A. Weiss și J.W. Truran.
- 196 energia acelei stări a carbonului ar putea fi considerabil mai mare:** Mai exact, cu aproximativ 60 000 volți. Această energie este foarte mică în comparație cu diferența de 7 644 000 volți dintre energia acestei stări instabile și cea a stării stabile a carbonului având energia cea mai joasă. Dar nu e nevoie de nici un reglaj fin pentru a face ca energia acestei stări instabile a nucleului de carbon să fie egală, în limitele acestei marje de eroare, cu suma energiilor nucleelor de beriliu-8 și de heliu, deoarece, cu o bună aproximație, stările relevante ale nucleelor de carbon și beriliu sunt molecule nucleare slab legate, constând din trei sau două nuclee de heliu. (Pentru această remarcă îi mulțumesc colegului meu Vadim Kaplunovsky de la Universitatea din Texas.)
- 196 există o situație în care el ține doar de bun-simț:** Această versiune a principiului antropic e numită uneori principiul antropic slab.
- 196 O posibilitate foarte simplă propusă de Hoyle:** *Galaxies, Nuclei, and Quasars* (Londra: Heinemann, 1965).
- 197 se pot deschide „găuri de vierme“:** Riguros vorbind, aceste găuri de vierme apar pe cale matematică în abordarea gravitației cuantice prin metoda integralei de drum euclidiene. Nu e limpede ce legătură există între ele și procesele fizice reale.
- 197 în fiecare din ei „constantele“ naturii iau valori diferite, cu probabilități diferite:** Coleman a susținut de asemenea (așa cum făcuseră înaintea lui Baum și Hawking) că probabilitățile corespunzând acestor constante prezintă la anumite valori maxime infinit ascuțite, astfel încât constantele e copleșitor de probabil să ia aceste valori. Dar această concluzie se bazează pe o formulare matematică (integrala de drum euclidiană) a cosmologiei cuantice care ar putea conține contradicții interne. E greu să avem certitudini în această privință, fiindcă operăm cu gravitația într-un context cuantic, acolo unde teoriile noastre actuale nu mai sunt valabile.
- 198 Einstein a regretat că își mutilase ecuațiile:** Pentru a demonstra din nou cât de complicată poate fi istoria științei, voi menționa că, imediat după apariția în 1917 a articolului lui Einstein despre cosmologie, prietenul său Wilhelm de Sitter a arătat că, atunci când ecuațiile de câmp

ale lui Einstein sunt modificate prin introducerea constantei cosmologice, acestea prezintă o clasă de soluții diferite, aparent statice, dar care nu conțin materie (sau conțin o cantitate neglijabilă de materie). Acest lucru l-a dezamăgit pe Einstein, deoarece în soluția lui constanta cosmologică este legată de densitatea medie a materiei cosmice, în conformitate cu ceea ce Einstein credea că reprezintă perspectiva lui Mach. Mai mult, soluția lui Einstein (cu materie) este de fapt instabilă; orice mică perturbare ar transforma-o în cele din urmă în soluția lui de Sitter. Pentru a complica și mai mult lucrurile, voi arăta că modelul lui de Sitter este doar aparent static; deși geometria spațiului-timp în sistemul de coordonate folosit de de Sitter nu se schimbă în timp, dacă introducem în universul lui particule de probă oricât de mici, acestea se îndepărtează unele de altele. De fapt, când în Anglia s-a aflat despre măsurătorile lui Slipher, la începutul anilor '20, Arthur Eddington le-a interpretat mai întâi prin prisma soluției de Sitter la ecuațiile lui Einstein *cu* constantă cosmologică, care au și o soluție statică, iar nu prin prisma teoriei inițiale a lui Einstein, fără soluție statică!

200 Fizicienii teoreticieni încearcă de ani de zile să înțeleagă anularea constantei cosmologice totale: O prezentare nematematică e dată de L. Abbott, *Scientific American* 258, nr. 5 (1985): 106.

200 în general aceasta e enormă: Nu putem nici măcar spera că vom găsi un mecanism prin care starea de vid să-și piardă energia dezintegrându-se într-o stare de energie mai joasă, iar astfel să scadă constanta cosmologică totală pentru a se ajunge în cele din urmă la o stare cu constantă cosmologică nulă, deoarece unele dintre aceste posibile stări de vid din teoriile corzilor au deja o constantă cosmologică totală mare și *negativă*.

200 Cea mai firească valoare pentru densitatea masei universului: Descoperirea unei densități mai mari sau mai mici ne-ar obliga să ne întrebăm de ce expansiunea a durat miliarde de ani și continuă să fie încetinită.*

CAPITOLUL X

204 respinge „ideea unei explicații ultime“: K.R. Popper, *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach* (Oxford: Clarendon Press, 1972), p. 195.

* Conform observațiilor astronomice recente, în prezent expansiunea nu e încetinită, ci e accelerată. (N. red.)

- 205 Filozoful Michael Redhead de la Cambridge sugerează:** M. Redhead, „Explanation“, august 1989, în curs de publicare.
- 206 la capătul drumului vom descoperi că nu există nici o lege:** O interesantă analiză a acestei posibilități a fost făcută de Paul Davies, „What Are the Laws of Nature“, în *The Reality Club* #2, ed. John Brockman (New York: Lynx Communications, 1988).
- 206 John Wheeler spunea uneori:** Vezi de exemplu J.A. Wheeler, „On Recognizing «Law Without Law»“, conferință ținută la sesiunea Asociației Americane a Profesorilor de Fizică și a Societății Americane de Fizică, 25 ianuarie 1983, *American Journal of Physics* 51 (1983): 398; J.A. Wheeler, „Beyond the Black Hole“, în *Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein*, ed. H. Wolf (Reading Mass: Addison-Wesley, 1980), p. 341.
- 206 Holger Nielsen a propus o „dinamică aleatoare“:** H.B. Nielsen, „Field Theories Without Fundamental Gauge Symmetries“, în *The Constants of Physics*, ed. W. McCrea și M.J. Rees (Londra: Royal Society, 1983), p.51; reeditată în *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* A310 (1983): 261.
- 207 Eugene Wigner ne-a prevenit:** E.P. Wigner, „The Limits of Science“, în *Proceedings of the American Philosophical Society* 1994 (1950): 422.
- 208 Probabil că cei mai mulți sunt de aceeași părere cu Redhead:** M. Redhead, „Explanation“.
- 209 Filozoful Robert Nozick de la Harvard:** R. Nozick, *Philosophical Explanation* (Cambridge Mass.: Harvard University Press, 1981), cap. 2.

CAPITOLUL XI

- 213 „Cerurile povestesc“:** Psalmi 19:2.
- 213 E firesc deci ca Stephen Hawking să numească legile naturii „mintea lui Dumnezeu“:** S. Hawking, *A Brief History of Time* (Londra: Bantam Books, 1988). Am întâlnit aceeași expresie și în titlurile a două cărți recente: J. Trefil, *Reading the Mind of God* (New York: Scribner, 1989), și P. Davies, *The Mind of God* (New York: Simon & Schuster, 1992).
- 213 Un alt fizician, Charles Misner, a folosit un limbaj asemănător:** C.W. Misner, *Cosmology, History and Theology*, ed. W.Y. Yourgrau și A.D. Breck (New York: Plenum Press, 1977), p. 97.
- 214 Einstein i-a spus odată asistentului său:** A. Einstein citat de Gerald Holton în *The Advancement of Science, and Its Burdens* (Cambridge: Cambridge University Press, 1986), p. 91.
- 214 Cu alt prilej, el a spus că rostul fizicii:** A. Einstein, contribuție la *Festschrift für Aunel Stadola* (Zürich: Orell Füssli Verlag, 1929), p. 126.

- 214 Teologul Paul Tillich a observat cândva:** P. Tillich, prelegere la Universitatea din Carolina de Nord, în 1960, citat de B. De Witt, „Decoherence Without Complexity and Without an Arrow of Time“, preprint, Centrul pentru Relativitate al Universității din Texas, 1992.
- 214 A urmat un dialog între doi membri ai comitetului:** Din transcrierea nepublicată a audierilor. Spre deosebire de cei care depun mărturie, kongresmenii au privilegiul de a-și vedea publicate observațiile în *Congressional Record*.
- 216 Einstein spunea odată că el crede în:** Interviu apărut în *New York Times*, 25 aprilie 1929. Îi datorez acest citat lui A. Pais.
- 216 Galilei, care a făcut ca spusele lui Copernic să devină plauzibile:** Studiile lui Galilei asupra mișcării au arătat că noi nu simțim, pe Pământ, mișcarea de rotație a Pământului în jurul Soarelui. De asemenea, descoperirea sateliților lui Jupiter a constituit un exemplu de sistem solar în miniatură. Dovada zdrobitoare a venit odată cu descoperirea fazelor lui Venus, care nu se potriveau cu ceea ce ar fi fost de așteptat dacă Venus și Soarele s-ar roti în jurul Pământului.
- 217 aceeași lege a gravitației determină atât mișcarea Lunii în jurul Pământului, cât și căderea unui corp pe suprafața Pământului:** Luna, care se rotește în jurul Pământului, în loc să zboare în linie dreaptă spre spațiul cosmic, capătă în fiecare secundă o componentă a vitezei de o zecime de țol pe secundă, îndreptată spre centrul Pământului. Teoria lui Newton a explicat că aceasta este de trei mii șase sute de ori mai mică decât accelerația unui măr care cade la Cambridge, deoarece Luna este de șaizeci de ori mai departe de centrul Pământului decât Cambridge, iar accelerația datorată gravitației scade cu inversul pătratului distanței.
- 217 Eroarea lui Schrödinger a fost sesizată de Max Perutz:** M.F. Perutz, „Erwin Schrödinger’s *What Is Life?* and Molecular Biology“, în *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polimath*, ed. C.W. Kilmeister (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), p. 234.
- 218 profesorul Phillip Johnson:** Pentru prima dată am auzit de profesorul Johnson când un prieten mi-a dat un articol de-al său: „Evolution as Dogma“, în *First Things: A Monthly Journal of Religion and Public Life*, octombrie 1990, pp. 15–22. El a mai publicat recent o carte, *Darwin on Trial* (Washington, D.C.: Regenery Gateway, 1991) și conform unei știri din *Science* 253 (1991): 379 ține o serie de conferințe în care își face cunoscute opiniile și scrierile.
- 220 într-o recenzie la cartea lui Johnson:** S. Gould, „Impeaching a Self-Appointed Judge“, în *Scientific American*, iulie 1992, p. 118.
- 224 John Polkinghorne a pledat cu convingere pentru o teologie:** J. Polkinghorne, *Reason and Reality: The Relation between Science and Theology* (Philadelphia: Trinity Press International, 1991).

- 225 de atunci n-am izbutit să scap de fraza asta:** Pentru două comentarii recente vezi S. Levinson, „Religious Language and The Public Square“, *Harvard Law Review* 105 (1992): 2061; M. Midgley, *Science as Salvation: A Modern Myth and Its Meaning* (Londra: Routledge, 1992).
- 225 interviuri cu douăzeci și șapte de cosmologi și fizicieni:** A. Lightman și R. Brawer, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990).
- 227 Pentru a folosi cuvintele lui Susan Sontag:** S. Sontag, „Piety Without Content“, în *Against Interpretation and Other Essays* (New York: Dell, 1961).
- 228 Istoricul Hugh Trevor-Roper spunea:** H.R. Trevor Roper, *The European Witch-Craze of the Sixteenth and Seventeenth Centuries, and Other Essays* (New York: Harper & Row, 1969).
- 228 După cum spunea Karl Popper:** K.R. Popper, *The Open Society and Its Enemies* (New York: Harper & Row, 1969).
- 228 David Hume a înțeles cu mult timp în urmă:** Vezi cartea sa *Treatise on Human Nature* (1739).
- 229 Istoria ecleziastică a Angliei:** Beda, *A History of the English Church and People*, traducere de Leo Sherley-Price revizuită de R.E. Latham (New York: Dorset Press, 1985), p. 127.

CAPITOLUL XII

- 233 Ulterior, Samios avea să numească acest vot:** Citat în *Science* 221 (1983): 1040.
- 234 a anunțat decizia ministerului său de a înceta lucrul la ISABELLE:** Tunelul destinat inițial pentru ISABELLE urmează acum să fie folosit de Acceleratorul de Ioni Grei Relativiști, un accelerator care va fi folosit la studiul ciocnirilor dintre nucleele ionilor grei, cu scopul de a înțelege materia nucleară, iar nu principiile fundamentale ale fizicii particulelor elementare. Se așteaptă ca acest accelerator de ioni grei să intre în funcțiune în 1997.
- 237 o materie întunecată exotică [...] putea să-și fi început condensarea gravitațională la un moment mult mai apropiat de big bang:** Această remarcă se aplică neuniformităților de dimensiune galactică, iar nu neuniformităților mult mai mari deduse din măsurătorile satelitului COBE. Acestea din urmă, sunt atât de mari, încât nici măcar o undă luminoasă nu le-ar fi putut străbate în cursul primilor trei sute de mii de ani de la începutul expansiunii actuale a universului, prin urmare (fie că erau sau nu alcătuite din materie întunecată) ele nu puteau crește semnificativ în acest interval.

- 239 în fiecare an sunt aduse aceleași argumente pro și contra:** După ce a fost ales districtul Ellis pentru amplasarea acceleratorului, un nou element și-a făcut apariția în dispută: acuzația unor politicieni din state precum Arizona, Colorado și Illinois, dezamăgiți că Texas câștigase competiția prin presiuni politice neloiale. Mulți au remarcat că Ministerul Energiei a anunțat amplasarea SSC în Texas la numai două zile după alegerea la președinție a lui George Bush. După anunțarea deciziei, ministrul Harrington a afirmat că grupul operativ care a evaluat cele șapte variante „optime” pentru amplasarea SSC a fost ferit de orice presiuni politice; că el însuși a primit raportul abia în ziua alegerilor; că grupul operativ a considerat net superioară amplasarea din Texas și că doar apoi a luat decizia finală împreună cu fostul președinte Reagan și președintele Bush, proaspăt ales. Sunt gata să accept că procesul putea fi accelerat și decizia putea fi anunțată înainte de alegeri, dar în acest caz ar fi apărut acuzația că anunțul a fost grăbit pentru a influența importantul vot din Texas. Pe de altă parte, chiar dacă alegerea amplasării nu a fost influențată de alegerea lui George Bush, Ministerul Energiei cunoștea fără îndoială forța delegației texane din Congres și entuziasmul ei pentru SSC, și putea spera că decizia amplasării în Texas ar mări șansele de finanțare pentru SSC. Dacă așa stau lucrurile, nu e nimic scandalos și nu e nici prima, nici ultima oară când o agenție guvernamentală își face asemenea calcule. În orice caz, pot depune mărturie că asemenea calcule nu au jucat nici un rol în alegerea celor șapte variante „optime” de amplasare făcută de comisia Academiei Naționale din care am făcut și eu parte. Comisia noastră a privit de la bun început amplasarea în Texas ca pe una dintre cele mai fericite variante. Aceasta se datora în parte calităților geologice excepționale. Un alt factor important a fost opoziția locală vehementă împotriva SSC din alte câteva zone de amplasare, cum ar fi la Fermilab, Illinois. În districtul Ellis aproape toată lumea a întâmpinat SSC cu bucurie.
- 239 proiectul unui „hârdău de porci”:** D. Ritter, *Perspectives*, vara lui 1988, p. 33.
- 240 proiecte hidrotehnice:** Vezi de exemplu R. Darman, citat de P. Aldhous în „Space Station Back on Track”, *Nature* 351 (1991): 507.

Cuprins

Prefață	5
I. Prolog	8
II. Despre o bucată de cretă.	22
III. Două argumente în favoarea reduționismului.	50
IV. Mecanica cuantică și dificultățile ei	63
V. Povestiri despre teorie și experiment	84
VI. Teorii frumoase	119
VII. Împotriva filozofiei	148
VIII. Melancolia secolului XX.	170
IX. Forma unei teorii ultime	187
X. La capătul drumului	204
XI. Și Dumnezeu?	213
XII. În districtul Ellis	231
Note	243